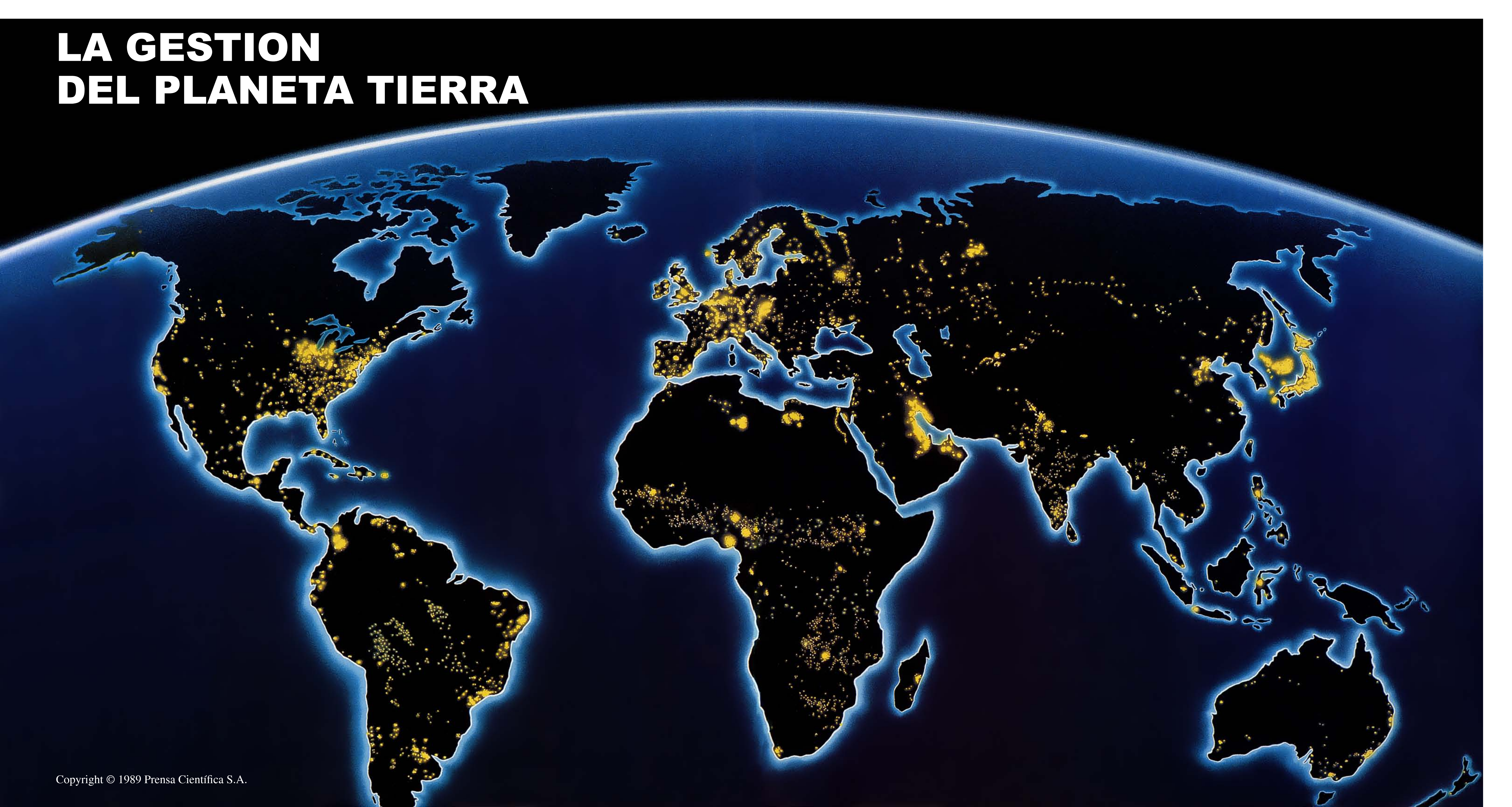
INVESTIGACION Y
CIENCIA

Noviembre 1989
650 Ptas.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL CUADRO DE PORTADA muestra los puntos de luz que reflejan la impronta del ser humano sobre la Tierra, según la vería, por la noche, un satélite. Las fuentes luminosas más densas corresponden a zonas urbanas (sobre todo en el hemisferio Norte), a la agricultura de tala y quema (en Sudamérica), a incendios de praderas (en Africa) y a llamas de gas natural (en Siberia y el golfo Pérsico). Los focos que emplean las flotas pesqueras para atraer el calamar iluminan el mar de Japón; el alumbrado de las ciudades delinea la ruta del ferrocarril transiberiano; el cordón luminoso del curso del río Nilo contrasta con la obscuridad sahariana. Aunque se trata de una reconstrucción aproximada (los incendios, por ejemplo, varían con las estaciones), refleja bien a las claras las pautas de la actividad humana por todo el mundo. George V. Kelvin recreó este mapamundi con datos que le suministró Woodruff Sullivan, de la Universidad de Washington. Sullivan ha confeccionado, por su parte, una imagen en mosaico, "La Tierra de noche", con fotografías obtenidas por satélite dentro del Programa de Satélites Meteorológicos de la Defensa, de los Estados Unidos.

LA GESTION DEL PLANETA TIERRA



Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa


Noviembre de 1989 Número 158



Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
12	Steve McCurry, Magnum Photos, Inc.
14-20	George Retseck
23	Richard O. Bierregaard, Jr., Photo Researchers, Inc.
24-26	Hank Iken
27	Chester C. Langway, Jr. (*arriba*), Hank Iken (*abajo*)
29	B. Barbey, Magnum Photos, Inc.
30	Hank Iken
33	Gary Braasch
34-36	Hank Iken
37	Claude Lorius, Lab. de Glaciología y Geofísica del Ambiente
38-39	Jesse Simmons
40	V. Ramanathan, Univ. Chicago
55	T. Daniel, Bruce Coleman Inc.
56	Hank Iken
57	Gabor Kiss
58	R. Pfortner, P. Arnold, Inc. (*arriba*), J. Foott, B. Coleman Inc. (*abajo*)
59	George Retseck
60	Ted Spiegel
61	Naciones Unidas
65-66	Gary Braasch
67-68	Patricia J. Wynne
69	*Landsat*, cortesía de Earth Observation Satellite Company, Lanham, Md.
70	M. J. Balick, P. Arnold, Inc. (*arriba, izq.*), M. J. Balick, Jardín Botánico. Nueva York (*arriba, dcha.*), M. Moffett (*abajo*)
72	S. Salgado, Jr., Magnum Photos
74-80	Ian Worpole
81	Robert Caputo
82	Hill and Knowlton
85	*Landsat*, cortesía de Earth Observation Satellite Company
86	Gabor Kiss
87	J. C. Tucker, NASA
88	Gabor Kiss
89	J. K. Aase, Departamento de Agricultura de los EE.UU.
91	Banco Mundial (*abajo*)
95	Currey and Clark, St. Cloud
96-97	Gabor Kiss
98	Paul Logsdon
99	Joe Lertola
100-101	Gabor Kiss
102	Chris J. Calwell, Natural Resources Defense Council
105	S. Varnedoe
106	Edward Bell (*abajo*)
106-107	Hank Iken (*arriba*)
108	Wellman, Inc.
109	G. Bodenburgh, G.M. Corp.
110	Joe Lertola
112	Mark Sherman, B. Coleman Inc.
114	Co. Rentmeester, The Image Bank
116-117	Johnny Johnson
118	R. Rai, Magnum Photos, Inc.
119-121	Ian Worpole
122	Centro Internac. sobre Investigación del Desarrollo, Ottawa
126-127	Warner Collection of the Gulf States Paper Corp. Tuscaloosa
128	George Retseck
129	Joe Lertola; datos © The New York Times Company
130	Joe Lertola
131	Joe Lertola (*arriba*), Scott Willis, *San Jose Mercury News*/Copley News Service (*abajo*)
132	Laurie Burnham
133	*Soviet Life*
136-137	Jearl Walker
138-140	Michael Goodman
142-143	Andrew Christie
144	Greg Turk, Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill
145	Andrew Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *La gestión del planeta Tierra* y *Juegos de ordenador*; Manuel Puigcerver: *Una atmósfera cambiante* y *Un clima cambiante*; J. J. Durán Valsero: *Los recursos hídricos, amenazados*; Joandomènec Ros: *La biodiversidad, amenazada*; Mireia Bofill: *El crecimiento demográfico*; Claudino Rodríguez Barrueco: *Nuevas estrategias agrarias*; Amando García: *Estrategias para el uso de la energía*; Juan P. Adrados: *Nuevas estrategias industriales*; J. M. García de la Mora: *Estrategias para un desarrollo económico viable* y *Hacia un mundo viable*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Ricardo J. Granados, Antonio Senye y Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Juan Gallardo, Luis Alonso, Rafael Alvarado, Javier Brey y Diego Diego Pavón

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham, Issue Editor; Elizabeth Corcoran; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; John Rennie; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46
Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

José M.ª López Piñero

...*cuatrocientos años*

Se publicó en Madrid el libro de Juan Pérez de Moya *Manual de Contadores. En que se pone en suma lo que un contador ha menester saber.*

Nacido en la localidad jiennense de Santisteban del Puerto hacia 1514, Pérez de Moya estudió en la Universidad de Salamanca, donde obtuvo el título de bachiller en artes. Más tarde se ordenó de sacerdote y en 1536 obtuvo una capellanía en su pueblo natal, cargo que dejó al trasladarse, en circunstancias que desconocemos, primero a la misma Salamanca y luego a Madrid y Alcalá, ciudades en las que enseñó matemáticas "con público aplauso", según el testimonio de Alejo Venegas. Durante los últimos años de su vida fue canónigo de la catedral de Granada, donde al parecer murió en 1592.

Pérez de Moya fue autor de numerosas obras, en su mayor parte de tema matemático. La primera de ellas fue el *Libro de cuenta* (1554), manual de cálculo mercantil, una de las aplicaciones prácticas de la aritmética de mayor importancia en la España del siglo XVI. Forma parte de una amplia serie de textos sobre el tema cuya aparición Maravall ha encuadrado dentro de la preparación cultural del mercader y de la utilización de la cultura como vía burguesa de ascenso social, subrayando que el espíritu de cálculo "no sólo hace posible las empresas modernas, sino que, traído por la mentalidad tipológicamente burguesa, informa los actos cotidianos de individuos de muy diferentes grupos". Dicha serie se inició con la *Suma de la art de arismetica* (1482), de Francesc Sanct Climent, y, durante la primera mitad del siglo XVI, su principal título fue el célebre *Tratado subtilissimo de Arismetica* (1512), de Juan de Ortega. Entre los más destacados de la segunda mitad de la centuria se encuentra el libro de Pérez de Moya que, reelaborado y resumido, se editó de nuevo en 1582 y 1589 con el título de *Manual de Contadores*, como hemos adelantado.

En 1558, Pérez de Moya publicó en Burgos su *Compendio de la Regla de la Cosa o Arte Mayor*, segundo tratado de álgebra impreso en lengua castellana, a continuación del *Libro primero de Arithmetica Algebratica*, de Marco Aurel, aparecido en Valencia seis años antes. En su prólogo, una figura intelectual de tanto relieve como Francisco Sánchez de las Brozas lo consideró "un libro que de hartos curiosos era deseado". Su contenido es análogo al de Aurel, significando, según Víctor Navarro, un retroceso en las notaciones, pero también mejoras en la teoría de ecuaciones. Reproduciremos a continuación dos fragmentos del mismo, relativo uno de ellos a "la defunción y denominación de la regla de álgebra o de la cosa y a sus primeros inventores" y el otro a "reglas y avisos para las igualaciones" (o ecuaciones):

"Algebra es un modo de hallar algún número dudoso demandado subjecto a alguna proporcionalidad, por lo cual por otro nombre le dicen cuenta hecha por progresiones de proporcionalidad geométrica. Nómbrase variamente, porque unos le dicen regla de Algebra, que quiere decir restauración. Otros almucabula, que en arábigo quiere decir posición, o contención o solidación. Otros la nombran regla de la cosa, o del cos. Todos son nombres del efecto, porque obrando en ella (para hecho de buscar algún número que tenga alguna propiedad o propiedades) se finge ser el número que se busca una cosa o lo que les paresce. Y porque esta posición, en varias lenguas se nombra variamente, de aquí sale la diversidad de sus nombres. Buteon la llamó cuadratura, no sé por qué, pues no solamente trata de cuadrados, mas de cubos y otras raíces. No lo usó nadie este nombre. Llámese como cada uno quisiere, que su fin no es otro sino mostrarnos a hallar algún número o números proporcionales ignotos demandados, si es posible darse; y de avisarnos las cuestiones que no son posibles (tomando para ello por medio, la proporción de igualdad). El inventor desta arte, según Leonardo Pisano, fue un mahometano hijo de Mosis Arábigo. Alfragano (como refiere Juan de Monte Regio) dice que Diofanto, y que escribió trece libros della. Otros dicen que el inventor fue un arábigo dicho Geber y que deste nombre se derivó álgebra. La utilidad desta regla, el que tratare con Euclides, lo podrá bien entender."

"Habiendo puesto lo que me pareció ser necesario para operación desta regla de la cosa, resta mostrar la orden que se ha de tener para saber hacer y proponer las demandas que por ella quisieres absolver, pues todo lo que se ha dicho es ordenado para este fin. Y así digo que para hacer cualquiera demanda por esta regla, has de presuponer que la tal demanda es ya hecha y respondida y que la quieres probar, poniendo por ejemplo que la respuesta de la tal demanda fuese una cosa con la cual procederás, haciendo lo que la demanda pidiese y lo que te viniese con la tal cosa, dirás ser igual a lo que quisieras que viniera, poniendo entre lo

uno y lo otro esta figura Ω que quiere decir ser lo uno igual a lo otro. De esto se sigue ser necesarias dos partes en estas igualaciones. La una lo que viniese con la operación de la cosa según lo que la demanda pide. Y la otra lo que quisieras que viniera."

La tercera obra de Pérez de Moya, titulada *Arithmetica practica y speculativa* (1562), es genealmente considerada como el texto matemático más importante de la España del siglo XVI. Su interés no reside en la originalidad, sino en que reúne una excelente información claramente sistematizada y expuesta de forma muy precisa y atractiva. Ello explica que, a pesar de estar escrita en castellano, alcanzara notable difusión en otros países y que Simon Stevin —el mejor aritmético de la época— la aconsejara para el estudio de la regla de tres y la citara al exponer la raíz cúbica. En España fue reimpresa quince veces hasta finales del siglo XVIII. Su "libro" noveno, integrado por dos diálogos en torno a la aritmética, fue editado en 1875 por Felipe Picatoste y recientemente (1987) ha vuelto a ser publicado por Rafael Rodríguez Vidal con numerosas notas y comentarios. Aquí parece oportuno ofrecer un fragmento perteneciente al estudio de la regla de tres:

"Dícese en un modo regla de tres porque en ella ocurren tres números. Dícese en otro modo regla aúrea porque, así como el oro es el más estimado metal y de mayor valor que otro ninguno, así esta regla lo es entre todas las demás del aritmética, por ser tan necesaria que en todas las operaciones se causa o sirve implícita o explícitamente, como claro paresce en el multiplicar y partir. Porque, multiplicando 12 cosas (o lo que quisieres) a 4 reales cada una, quiere decir que si una vale 4, ¿qué valdrán 12? Y por la regla de tres (como luego diremos) se hace multiplicando el segundo número por el tercero, y partiendo por el primero; y porque en estos casos de la regla de tres que salen del multiplicar, el número primero es unidad y cualquiera cantidad que se partiere por la unidad vendrá al cuociente la misma cantidad que se partiese (como el sexto principio del libro segundo muestra), por tanto, después de haber multiplicado el segundo número por el tercero, no se parte por el primero, porque por ser unidad vendrá lo mismo como dicho habemos... Y porque según se dijo al principio del segundo libro, el multiplicar es efecto compendioso del sumar y el partir es compendio del restar, se podría por tanto decir que virtualmente todas las reglas generales constan de la regla de tres, por el cual efecto se entiende que le cuadra el nombre de madre y origen general de todas las reglas y operaciones del Aritmética".

Del resto de la producción de Pérez de Moya recordaremos únicamente sus *Fragmentos Mathematicos*, que publicó en 1567-1568 y, con título y contenido algo distintos, en 1573. Los dedicó a "cosas de geometría y astronomía, y geografía, y philosophia natural, y sphera, y astrolabio, y navegación, y reloxes". Están redactados desde la perspectiva de las bases matemáticas de "todas artes liberales y mechanicas", citando en cada tema los principales autores de la época, entre ellos, a Copérnico, el portugués Nunes y los tratadistas de náutica Pedro Medina y Martín Cortés.

ARITHMETICA
PRACTICA, Y SPECVLATIUA DEL BACHILLER IUAN
PEREZ DE MOYA.



Agora nueuamente corregida, y añadidas por el miſmo author muchas coſas, con otros dos libros, y vna Tabla muy copioſa de las coſas mas notables de todo lo que en eſte libro ſe contiene.

Va dirigida al muy alto y muy poderoſo ſeñor don Carlos Principe de Eſpaña nueſtro ſeñor.

Con licencia y priuilegio Real.

EN SALAMANCA.
Por Mathias Gaſt.
1562

Eſta taſſado à cinco blancas el pliego,

Portada de la edición de 1562 de la Arithmetica practica y speculativa, *de Juan Pérez de Moya.*



La gestión del planeta Tierra

Presentación de un número monográfico en el que se exploran las perspectivas de un desarrollo humano viable sobre un planeta de recursos limitados y ambiente frágil

William C. Clark

Cada forma de vida afronta continuamente el problema de reconciliar su capacidad innata de crecimiento con las facilidades y las limitaciones surgidas de su interacción con el entorno natural. El impresionante éxito de nuestra especie al habérselas con tal problema queda reflejado en la llamativa imagen que adorna la portada de este número monográfico de *Investigación y Ciencia*. Este éxito inicial, empero, no es más que el principio de la historia.

Ciertas analogías pueden resultarnos útiles al tratar de imaginar las distintas vías por la que esta historia podría discurrir. El motivo luminoso que a escala global han creado las civilizaciones de hoy no son disímiles de las pautas de exuberante crecimiento que pronto acontecen tras introducir bacterias en un disco de Petri rico en nutrientes. En el limitado mundo del disco, tal crecimiento no se puede sostener indefinidamente. Tarde o temprano, conforme las poblaciones bacterianas agotan los recursos disponibles y se hunden en sus propios desechos, su florecimiento inicial queda reemplazado por el estancamiento o el desplome.

El paralelismo deja de existir en la medida en que las colonias bacterianas carecen de control sobre su ambiente finito y, en consecuencia, no son responsables de su definitiva colisión con él. En cambio, los manantiales mismos de la inventiva y la energía humana, que tanto están transformando la Tierra, nos han dado, al propio tiempo, una comprensión sin precedentes de cómo funciona el planeta, de la forma en que nuestras actividades actuales ponen en peligro su desenvolvimiento y de cómo podemos intervenir para mejorar las perspectivas de un desarrollo viable. Nuestra capacidad para volver la vista hacia nosotros mismos desde el espacio exterior es símbolo de la panorámica excepcional que de nuestro entorno disponemos y de hacia dónde nos encaminamos como especie. Conocimiento que entraña una responsabilidad no imputable a las bacterias, a saber, la responsabilidad de gestionar el uso que los humanos hacen del planeta Tierra.

Los individuos han comenzado a responder a la conciencia cada vez más difundida de que se está produciendo un cambio ambiental global, y lo han hecho reajustando sus valores, sus convicciones y sus actos. Tales cambios en la conducta individual son, sin duda, necesarios, pero no suficientes. Por nuestra condición de especie de implantación global estamos transformando el planeta. Será sólo como especie universalista —haciendo fondo común de nuestros conocimientos, coordinando nuestras acciones y compartiendo lo que el planeta pueda ofrecernos— como tendremos alguna expectativa de gestionar y orientar la transformación del planeta por el camino de un desarrollo viable. La administración responsable, reflexiva e inteligente de la Tierra constituye uno de los grandes retos que ha de encarar la humanidad al acercarse al siglo XXI.

Aunque los esfuerzos por organizar las interacciones entre los humanos y su entorno son tan antiguos como la civilización humana, el problema de gestión se ha visto transformado, en nuestros días, por la aceleración sin precedente en el ritmo, escala y complejidad de tales interacciones. Lo que antaño eran incidentes de contaminación a escala local implican hogaño a varios países; véase, si no, la preocupación por las precipitaciones ácidas en Europa y Norteamérica. Lo que en tiempos fueron episodios agudos, con daños relativamente reversibles, afectan ahora a muchas generaciones, como da testimonio la controversia sobre eliminación de residuos químicos y radiactivos. Lo que en tiempos fueron confrontaciones directas entre preservación ecológica y crecimiento económico comportan ahora multitud de conexiones, según atestiguan los bucles retroactivos entre consumo energético, agricultura y cambio climático que concurren, según se cree, en generar el efecto de invernadero.

Hemos entrado en una era caracterizada por síndromes de cambio global emanados de la interdependencia entre ambiente y desarrollo humano. Al esforzarnos por pasar de ser mera causa de tales síndromes a querer controlarlos conscientemente, es preciso atender a dos cuestiones fundamentales. Primera: ¿qué clase de planeta deseamos? Segunda: ¿de qué clase de planeta disponemos?

La clase de planeta que deseemos es, en última instancia, cuestión de valores. ¿Cuán grande debería ser la diversidad de especies que nuestro mundo

1. LA GESTION del planeta Tierra exigirá dar respuesta a dos cuestiones: ¿qué clase de planeta deseamos? y ¿qué clase de planeta podemos tener? Su resolución requiere que los seres humanos comprendan de qué forma afectan sus actividades al ambiente global; es preciso también que diseñen estrategias para desarrollar el planeta. La fotografía simboliza un aspecto local de una posible estrategia global: una joven nepalí planta un árbol, dentro de un proyecto de repoblación forestal.

WILLIAM C. CLARK es investigador asociado de la Escuela Kennedy de Ciencias Políticas de la Universidad de Harvard. Se graduó por la Universidad de Yale, en 1971, doctorándose por la de Columbia Británica en 1979. Clark dirigió estudios sobre el desarrollo viable de la biosfera en el Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados, en Austria. Es miembro del comité sobre cambio global de la Academia Nacional de Ciencias estadounidense y editor de la revista *Environment*. Sus inquietudes en la Escuela Kennedy se centran en las dificultades políticas consecuentes a los conflictos internacionales sobre desarrollo, ambiente y seguridad. Clark recibió, en 1983, el premio MacArthur.

ha de mantener? ¿Deben imponerse límites al tamaño o a la tasa de crecimiento de la población humana, al objeto de proteger el ambiente global? ¿Qué grado de cambio climático es aceptable? ¿Cuánta pobreza? ¿Deberíamos pensar en las grandes profundidades oceánicas para verter en ellas residuos peligrosos?

La ciencia puede arrojar luz sobre estas cuestiones, pero no resolverlas. Hemos de ser nosotros quienes decidamos las respuestas; a nuestros nietos tocará vivir sus consecuencias. Dado que diferentes personas poseen distintas circunstancias vitales, y no menos distintos sistemas de valores, es de esperar que las decisiones individuales varíen enormemente. Como Gro Harlem Brundtland señala, pobres y ricos tienden a conceder muy diferentes valores al crecimiento económico y a la conservación ambiental. Pero el viejo debate sobre la antinomia desarrollo económico-conservación ambiental ha alcanzado ya cierto nivel de maduración. Ha empezado a concretarse un amplio consenso, según el cual las interacciones entre los humanos y su ambiente deberían gestionarse teniendo por meta un desarrollo viable.

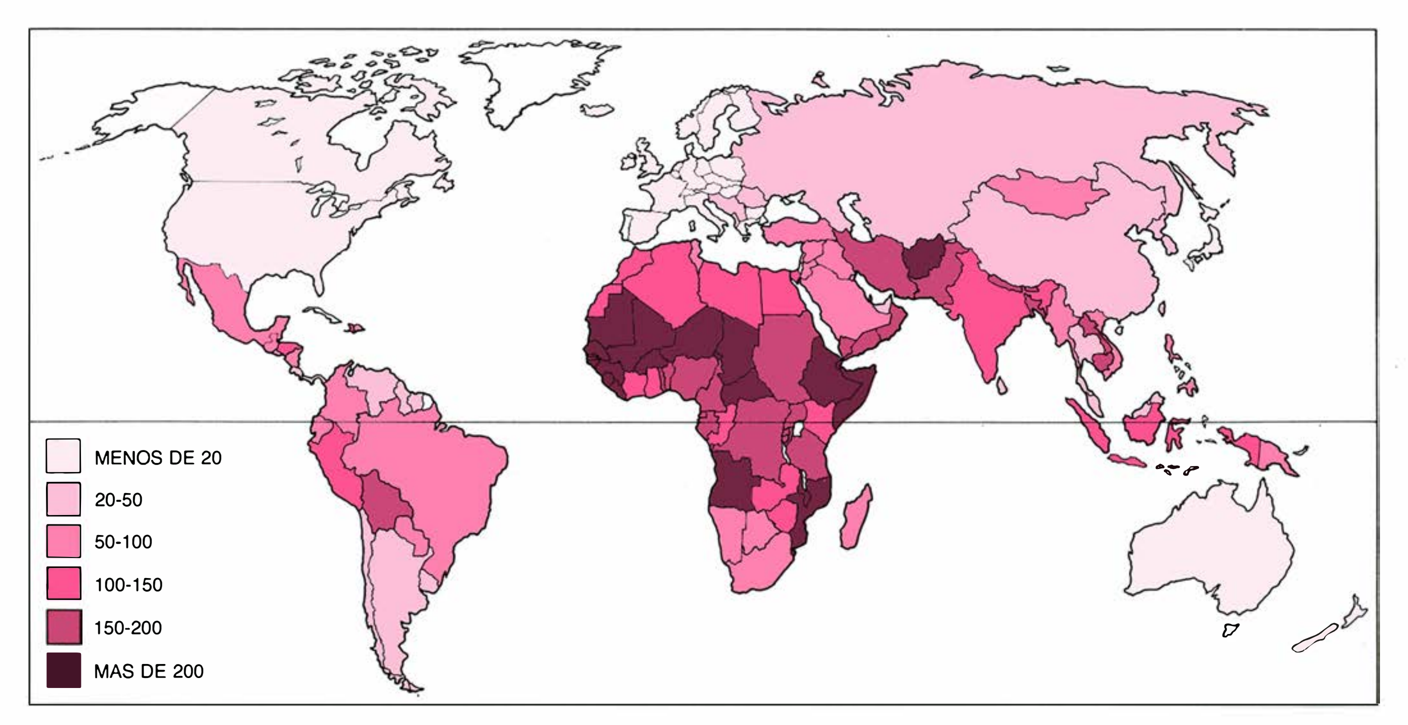
La Comisión Mundial de Ambiente y Desarrollo ("World Commision on Environment and Development", WCED), que preside la Primera Ministra Brundtland, describe el desarrollo viable como el conjunto de vías de progreso económico, social y político que atienden a "las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". Así, pues, el desarrollo viable refleja un sistema de valores para la gestión del planeta Tierra en el que es importante la equidad; equidad entre las gentes que hoy pueblan el mundo; equidad entre los padres y los nietos.

Encaminar la gestión del planeta Tierra hacia un desarrollo viable no resulta empresa menos intimidante por su urgencia. Las dimensiones humanas fundamentales de la tarea son exploradas aquí por Nathan Keyfitz en "El crecimiento demográfico", y por Jim MacNeill en "Estrategias para un desarrollo económico viable". Aunque la situación nos sea familiar, vale la pena mencionarla a grandes rasgos. Nuestro planeta está habitado por más de 5000 millones de personas, que se apropian cada año del 40 por ciento del material orgánico fijado sobre el suelo por fotosíntesis, que consumen el equivalente de dos toneladas de carbón por persona y producen, por término medio, 150 kilogramos de acero por cada hombre, mujer y niño que hay sobre la Tierra. La distribución geográfica de estas personas, su bienestar y el impacto que producen sobre el ambiente varían de forma muy importante de unos países a otros [*véanse las figuras 2-5*].

En un extremo, el 15 por ciento más rico de la población mundial consume más de la tercera parte del fertilizante del planeta y más de la mitad de su energía. En el otro, alrededor de una cuarta parte de la población mundial pasa hambre, como mínimo, durante algunas estaciones del año. Más de una tercera parte viven en países donde la mortalidad infantil supera el 10 por ciento. La gran mayoría subsisten con rentas per cápita inferiores a los niveles oficiales de pobreza en los Estados Unidos.

Al mirar hacia el futuro, nos anima observar que la tasa de crecimiento de la población humana está declinando virtualmente por doquier. Empero, aun cuando las tendencias responsables de tal declive continúen, el siglo próximo verá probablemente cómo se duplica el número de personas que tratan de extraer del planeta su propia subsistencia. Casi todo el aumento de población tendrá lugar en los países que hoy son más pobres. Según el WCED, durante los 50 años venideros sería necesario incrementar de 5 a 10 veces la actividad económica mundial para atender las necesidades y aspiraciones básicas de la población futura. Las consecuencias que semejante aumento de la actividad económica podría tener sobre un entorno ya sobrecargado son, cuando menos, problemáticas y potencialmente catastróficas.

En consecuencia, los esfuerzos por gestionar el desarrollo viable de la Tierra han de guiarse por tres objetivos específicos. El primero es la propagación



2. MORTALIDAD INFANTIL, un parámetro indicativo del bienestar de una población. El mapa nos muestra los fallecimientos de niños de hasta cinco años por millar de nacidos vivos. Más de la tercera parte de la población mundial vive en países donde la mortalidad supera el 10 por ciento. Los datos, que son estimaciones para el quinquenio 1985-90, han sido tomados del Departamento de Asuntos Sociales y Económicos Internacionales de la ONU.

del conocimiento y de los medios necesarios para controlar el crecimiento de la población humana. El segundo consiste en facilitar un crecimiento económico lo suficientemente vigoroso y una equitativa distribución de sus beneficios, para atender a las necesidades fundamentales de ésta y de sucesivas generaciones. El tercero, estructurar el crecimiento en formas que mantengan su enorme potencial de transformación ambiental dentro de límites seguros, límites que todavía están por determinar.

Si bien las metas que el desarrollo viable se propone describen el tipo de planeta que los humanos deseamos, la segunda pregunta sigue abierta: ¿qué clase de planeta podemos conseguir en realidad? Al abordar esta cuestión, el foco se desplaza de lo que valoramos a lo que sabemos.

En última instancia, las estrategias de desarrollo viable han de plasmarse en acciones locales para poder producir algún efecto. Sin embargo, como ya he hecho notar, muchas de las dificultades más correosas que plantea dicha viabilidad comportan escalas temporales de decenios, cuando no de siglos, y su desarrollo espacial ha de medirse a escala global. Cualesquiera mejoras de importancia en nuestra capacidad para gestionar el planeta Tierra exigirán que aprendamos a poner en relación las acciones de desarrollo local con la perspectiva ambiental global.

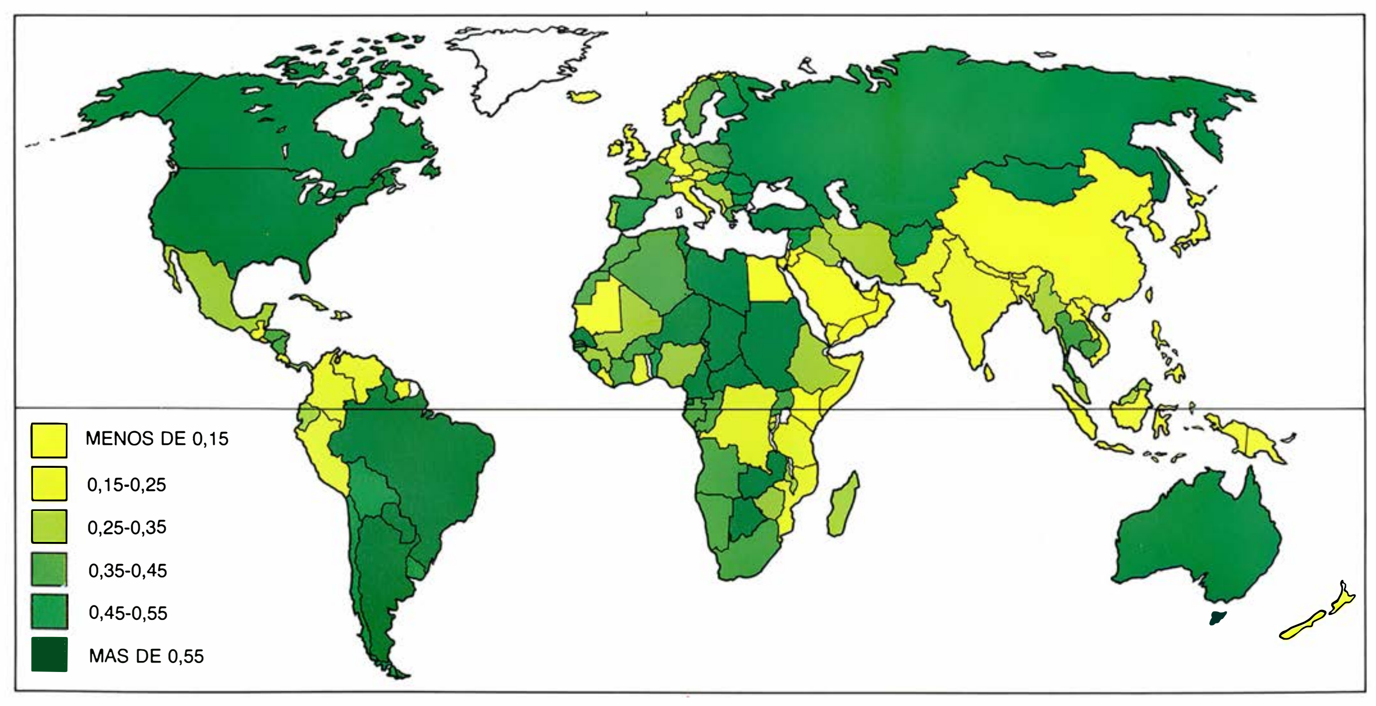
Por fortuna, nuestra comprensión del cambio ambiental global ha experimentado una revolución durante los últimos años. Tal revolución se enraíza en los años veinte, con los escritos seminales del mineralogista ruso Vladimir I. Vernadsky sobre la biosfera. El Año Geofísico Internacional de 1957 le proporcionó un vigoroso impulso, que en la actualidad conserva merced a una activa red de supervisión e investigación extendida por todo el mundo, que tiene por cimera un nuevo y ambicioso Programa Internacional de la Geosfera y la Biosfera. Aunque la revolución del "cambio global" dista de estar completa, podemos ver sus rasgos principales en la figura 6.

La imagen del cambio ambiental esbozada en la ilustración nos presenta un planeta dominado, a lo largo de decenios y siglos, por las interacciones entre el clima y los flujos químicos de los principales elementos, interacciones entretejidas por el ciclo hidrológico global e influidas de forma notoria por la presencia de vida.

El sistema climático incorpora procesos atmosféricos y oceánicos que gobiernan la distribución global de vientos, lluvias y temperaturas. Entre los procesos que desempeñan papel central en la transformación y gestión humana del planeta Tierra, se cuentan los cambios en la concentración de los gases de invernadero y su efecto sobre la temperatura; los efectos de la circulación oceánica sobre la temporización y la distribución de los cambios climáticos; y el papel desempeñado por la vegetación en la regulación del flujo hídrico entre las tierras emergidas y la atmósfera [véase, más adelante, "Un clima cambiante", por Stephen H. Schneider].

Un segundo componente de interés en el ambiente planetario estriba en la circulación y procesamiento de los principales elementos químicos: carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre. Estos elementos son los principales componentes de la vida. En forma de compuestos (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso), ejercen también notable influencia sobre el clima. Incluso en ausencia de actividad humana, el clima y la química terrestres han experimentado cambios bruscos y ligados entre sí, como refleja el registro de hielos eternos. Sumada a estas fluctuaciones naturales, la intervención del hombre ha creado perturbaciones en los flujos químicos globales, que se manifiestan en forma de bruma química ("smog"), lluvia ácida, disminución del ozono estratosférico y en otros problemas. [Véase en este número "Una atmósfera cambiante", por Thomas E. Graedel y Paul J. Crutzen.]

El tercero de los componentes de la figura, el ciclo hidrológico, abarca los procesos de evaporación y precipitación, de escorrentía y circulación. El agua es agente clave en el cambio topográfico y es la reguladora general de la química y el clima global. Como des-



3. TIERRA CULTIVABLE per cápita. Se trata de un índice de la flexibilidad de las sociedades para ajustar los usos a que dedican sus tierras. Mostramos aquí la tierra cultivable en hectáreas per cápita correspondiente a mediados de nuestro decenio. Los países que disponen de menos de 0,2 hectáreas per cápita padecen duras limitaciones en sus opciones para gestionar el ambiente. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.)

cribe J. W. Maurits la Rivière en su artículo "Los recursos hídricos, amenazados", entre los impactos de origen humano sobre el ciclo hidrológico que exigen atención, se cuentan la contaminación de las aguas freáticas, de las aguas superficiales y de los océanos, la redistribución de los acuíferos sobre la superficie terrestre y las potenciales alteraciones del nivel de los mares inducidas por el calentamiento del globo.

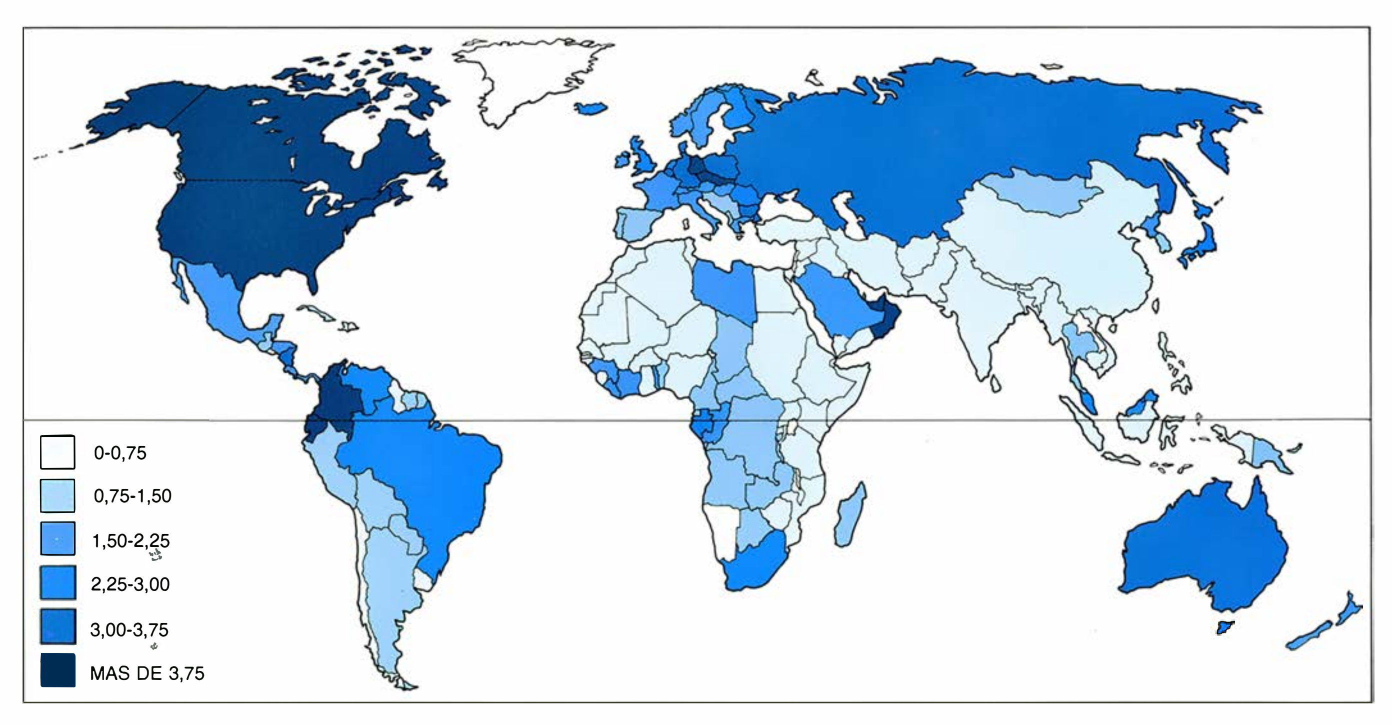
La vida, el último de los componentes de la figura 6, ha encontrado el ambiente del planeta Tierra repleto de posibilidades, que han resultado en un grado pasmoso de diversidad biológica, diversidad que está disminuyendo rápidamente [véase más abajo "La biodiversidad, amenazada", por Edward O. Wilson]. No se ha reconocido, hasta hace muy poco, que la vida constituye también un agente clave en el condicionamiento y regulación del ambiente global, por su influencia en los ciclos químico e hidrológico. Finalmente, una forma de vida –la especie humana– ha crecido de forma tal, a lo largo de los últimos siglos, que ha pasado de una posición de influencia despreciable a escala planetaria a otra de gran trascendencia en cuanto agente del cambio global.

A pesar de que nuestro conocimiento del sistema terrestre está en rápida expansión, todavía no sabemos lo suficiente acerca de él para afirmar con certeza cuánta perturbación puede tolerar el sistema en su conjunto o cuál pueda ser su capacidad para sostener el desarrollo humano. Mas no es poco lo que sabemos sobre las interacciones entre componentes individuales del ambiente global y determinadas actividades específicas humanas. Tal conocimiento, que confesamos incompleto, proporciona no obstante perspectivas útiles en lo atinente a la gestión planetaria.

La población humana se ha multiplicado por ocho desde los comienzos del siglo XVIII hasta nuestros días. La esperanza media de vida se ha duplicado, cuando menos. Durante el mismo período, la actividad económica humana ha adquirido un carácter más y más global; las demandas de bienes y servicios de una parte del planeta son atendidos hoy con suministros venidos de la otra mitad del mundo. El volumen de los bienes intercambiados en el comercio internacional se ha multiplicado por 800 o más, bienes que representan en nuestros días más de un tercio del producto económico total del mundo.

Los tres componentes de tal crecimiento y globalización de la actividad humana que han producido máximo influjo en el ambiente son la agricultura, la energía y la industria. Cada uno de estos componentes se examina por extenso en artículos siguientes. La agricultura ha sido el agente dominante de la transformación global de las tierras: desde mediados del siglo pasado, nueve millones de kilómetros cuadrados de la superficie terrestre se han convertido en tierras cultivables permanentes [véase el artículo de Pierre R. Crosson y Norman J. Rosenberg "Nuevas estrategias agrarias"]. El consumo de energía se ha elevado 80 veces a lo largo de igual período, con profundas consecuencias para los flujos químicos de carbono, azufre y nitrógeno [véase "Estrategias para el uso de la energía", por John H. Gibbons, Peter D. Blair y Holly L. Gwin]. Finalmente, la producción industrial del mundo se ha centuplicado de lejos en 100 años, sostenida por tasas de incremento anual a largo plazo de más del 3 por ciento en el consumo de metales tan básicos como el plomo, el cobre o el hierro [véase "Nuevas estrategias industriales", por Robert A. Frosch y Nicholas E. Gallopoulos].

La transformación del ambiente planetario inducida por tal explosión de la actividad humana resulta especialmente evidente en los cambios que muestra el paisaje físico. Desde los comienzos del siglo XVIII, el planeta ha perdido 6 millones de kilómetros cuadrados de bosque, una superficie mayor que toda Europa. La degradación de los suelos ha aumentado en grado incierto, pero importante [*véase la figura 5*]. La carga de sedimentos se ha triplicado en los cursos fluviales principales y octuplicado en la cuencas menores que sopor-



4. EMISIONES de dióxido de carbono; constituyen uno de los elementos agresivos de la activiad humana sobre el ambiente. Vemos aquí las emisiones de CO_2 debidas al uso de energía, a la industria y a la deforestación, expresadas mediante toneladas anuales de carbono per cápita. Los valores más altos corresponden a los Estados Unidos y la República Democrática Alemana; los más bajos, a Burundi y Bhutan. Datos recopilados por Susan Subak.

tan una intensa actividad humana; el consecuente flujo de carbono hacia el mar se cifra entre los mil y dos mil millones de toneladas anuales. En igual período histórico, la masa de agua que los humanos detraen del ciclo hidrológico ha debido incrementarse desde unos 100 kilómetros cúbicos anuales hasta unos 3600, un volumen equivalente al del lago Huron.

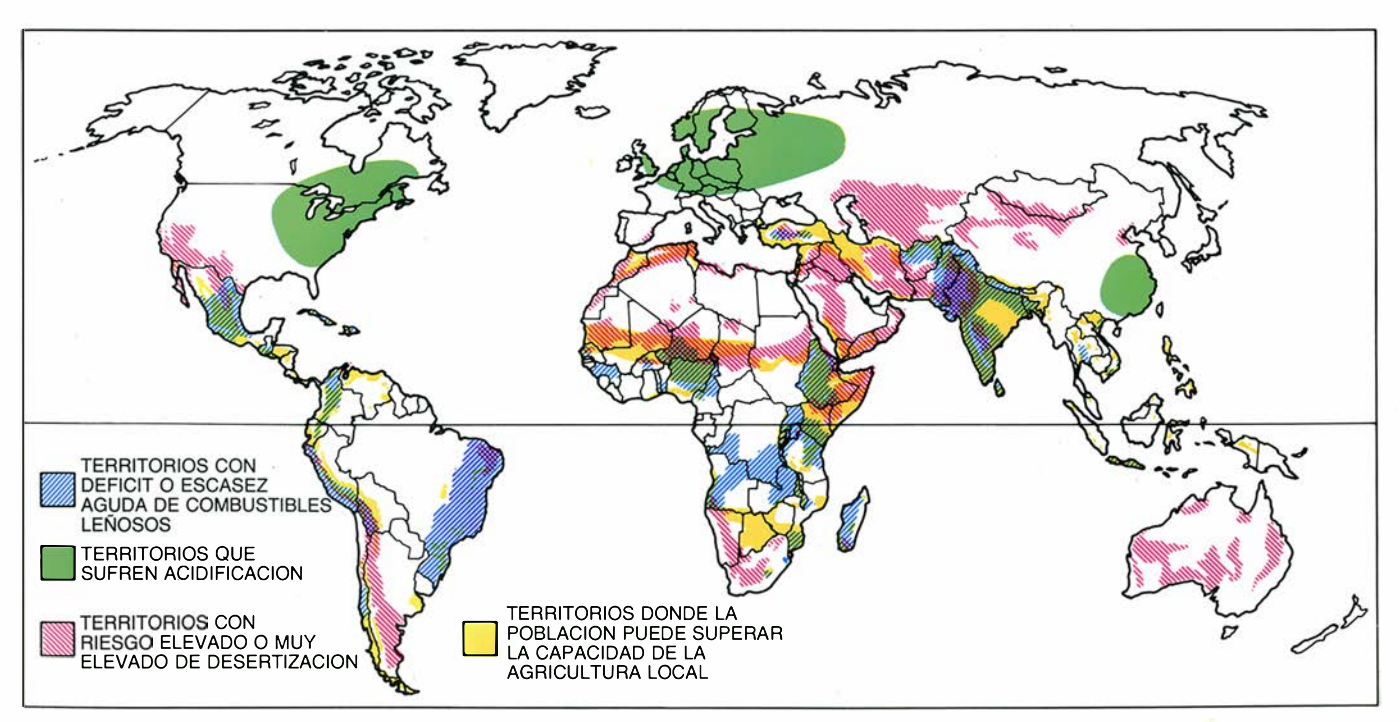
También se han producido muchos cambios sustanciales en los restantes flujos químicos del planeta. Durante los 300 últimos años, el desarrollo industrial y agrícola ha duplicado el contenido en metano de la atmósfera y ha incrementado en un 25 por ciento la concentración de dióxido de carbono. Los flujos globales de elementos importantes, como el azufre y el nitrógeno, a resultas de la actividad humana, son comparables con los flujos naturales de dichos elementos, cuando no mayores. Entre los metales traza, muchos de ellos perniciosos para la vida, Jerome O. Nriagu, del Instituto Canadiense de Estudio de las Aguas, y Jozef M. Pacyna, del Instituto Noruego de Investigación de la Contaminación Atmosférica, han hecho ver que las emisiones humanas de plomo, cadmio y zinc exceden a los flujos emanados de fuentes naturales en factores de 18, cinco y tres, respectivamente. Por lo que atañe a otros metales, entre los que se cuentan el arsénico, el mercurio, el níquel y el vanadio, la contribución humana es ahora no menor del doble de la procedente de fuentes naturales. Finalmente, de los más de 70.000 compuestos químicos sintetizados por los humanos, cierto número de ellos, como los compuestos clorofluorcarburos y el DDT, afectan de modo importante al ambiente global, incluso a muy bajas concentraciones.

La evaluación de las posibilidades de desarrollo viable que ofrece la Tierra muestra que la aceleración del ritmo al que las actividades humanas están transformando el planeta pueden revestir tanta importancia como las magnitudes absolutas que intervienen. B. L. Turner, Robert K. Wates y el autor han analizado las tasas históricas de transformación correspondientes a diversos componentes del sistema ambiental global. Empezamos por definir el carácter reciente del cambio, fijando la fecha hacia la cual había tenido lugar la mitad de la transformación, desde los tiempos prehistóricos hasta el presente. A continuación, evaluamos la aceleración del cambio, comparando la tasa presente de transformación con la de hace una generación. La impresión dominante de este análisis es la breve historia de la mayor parte del cambio ambiental global. Ninguno de los componentes que examinamos había alcanzado el 50 por ciento de su transformación global antes del siglo XIX. La mayoría sólo llegó a superar el nivel del 50 por ciento en la segunda mitad del siglo XX.

Amén de esta conclusión general, son apreciables cuatro grandes pautas de transformación. La primera de ellas, caracterizada por cambios establecidos desde antiguo y todavía en aumento, se distingue por la deforestación y la erosión del suelo. La segunda, establecida hace relativamente poco y todavía en aceleración, se distingue por la destrucción de la diversidad floral, la detracción de agua del ciclo hidrológico, los flujos de sedimentos y la movilización humana del carbono, nitrógeno y fósforo. Hay pocos motivos para creer que la sociedad humana haya aprendido hasta ahora a gestionar a escala global ninguna de estas transformaciones del ambiente, cuya aceleración vemos persistir.

Un poco menos descorazonadoras son las dos tendencias en deceleración. Las extinciones de vertebrados terrestres inducidas por los humanos alcanzaron la mitad del total presente a finales del siglo XIX y, al parecer, se están produciendo más lentamente hoy que hace una generación. El grupo restante de transformaciones que examinamos (emisiones de azufre y plomo, precipitación radiactiva, un disolvente orgánico representativo y la extinción de mamíferos marinos) suponen también fenómenos peculiares del siglo XX, que están hoy decelerando.

La burda medida de deceleración a



5. DEGRADACION de las tierras. Es consecuencia de múltiples actividades humanas. Se ilustran aquí las regiones amenazadas por la desertización, por la excesiva recolección de leña, por las lluvias ácidas y por otras agresiones resultantes de tener que alimentar más personas de las que la tierra puede sustentar. Datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y de la comisión científica sobre Problemas Ambientales.

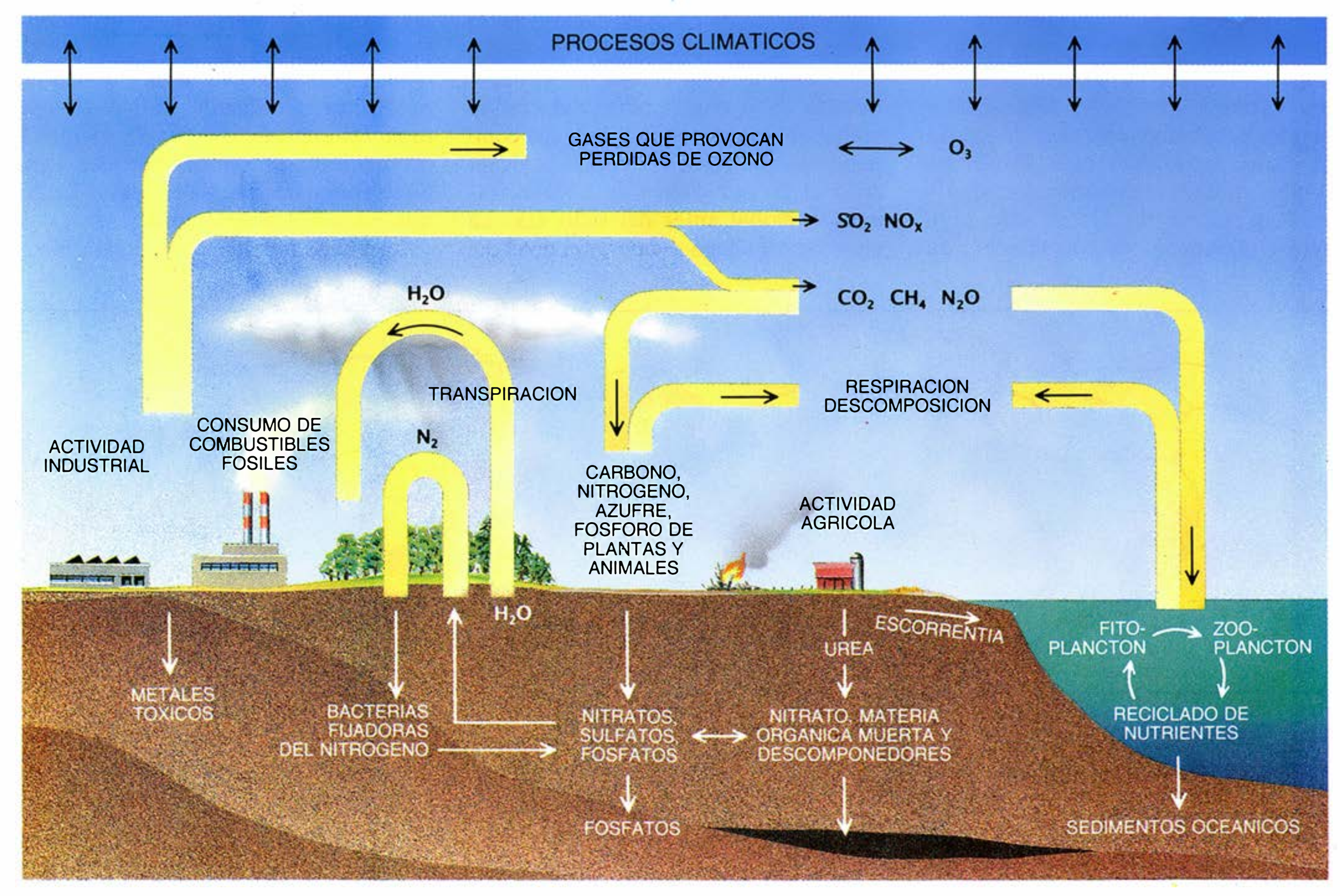
largo plazo aquí presentada no asegura que tal declive en las tasas de transformación sea reflejo de una mayor competencia en la gestión planetaria. (Por ejemplo, las tasas específicas de transformación podrían estar declinando sencillamente porque no quedan especies que exterminar o porque hemos recurrido a combustibles más baratos, que emiten contaminantes diferentes.) No obstante, en la mayoría de los casos mencionados, al menos una fracción de la deceleración es atribuible a esfuerzos deliberados de gestión ambiental, concebidos a gran escala y a largo plazo.

Las pautas globales esbozadas hasta el momento proporcionan una panorámica necesaria, aunque insuficiente, desde la cual reflexionar sobre las posibilidades de mejorar la gestión del planeta Tierra. No menos necesaria es la estimación de los aspectos regionales del cambio. El análisis pormenorizado de situaciones regionales desborda el alcance de este ensayo; no obstante, convendría tener presente la extraordinaria gama de circunstancias locales con las que será necesario habérselas, si se pretende conducir la transformación humana del planeta por la senda del desarrollo viable.

Toda clasificación de las perspectivas regionales de desarrollo viable simplificará inevitablemente la realidad. Una de las simplificaciones más instructivas distingue, de las asociadas con la opulencia, las interacciones entre ambiente y el desarrollo asociadas a la pobreza. Otra distingue interacciones que suponen bajas densidades de población de las que acompañan a las grandes densidades de población. Al combinar estas dos simplificaciones, se obtiene la clasificación que vemos en la figura 7.

Las zonas de baja renta y densidad humana, como la Amazonía y Malasia-Borneo, constituyen fronteras de asentamiento utilizables todavía por las gentes de los países menos desarrollados. Hasta hace muy poco, tales regiones soportaban poblaciones escasas; las intrusiones del mundo industrializado estaban confinadas a unas pocas plantaciones e instalaciones mineras. La situación ha cambiado radicalmente a lo largo de los últimos 20 años, al ser invadidas por seres humanos dedicados a la explotación maderera y a la cría de ganado a gran escala. La mezcla de agricultura comercial y de subsistencia, sumada a la extracción industrial de recursos, ha suscitado un patrón singular de transformación del paisaje, cuyas consecuencias aún no es posible evaluar plenamente. De todas formas, parece inevitable la reducción de la diversidad biológica y la degradación de la productividad orgánica [véase "La biodiversidad, amenazada", por Edward O. Wilson]. La pobreza de los colonos sin tierras, empeñados en limpiarlas para el cultivo, unida a la relativa indolencia de las instituciones indígenas que podrían guiar el desarrollo viable de tales regiones, harán de ellas componentes especialmente problemáticos en cualquier estrategia tendente a la gestión planetaria.

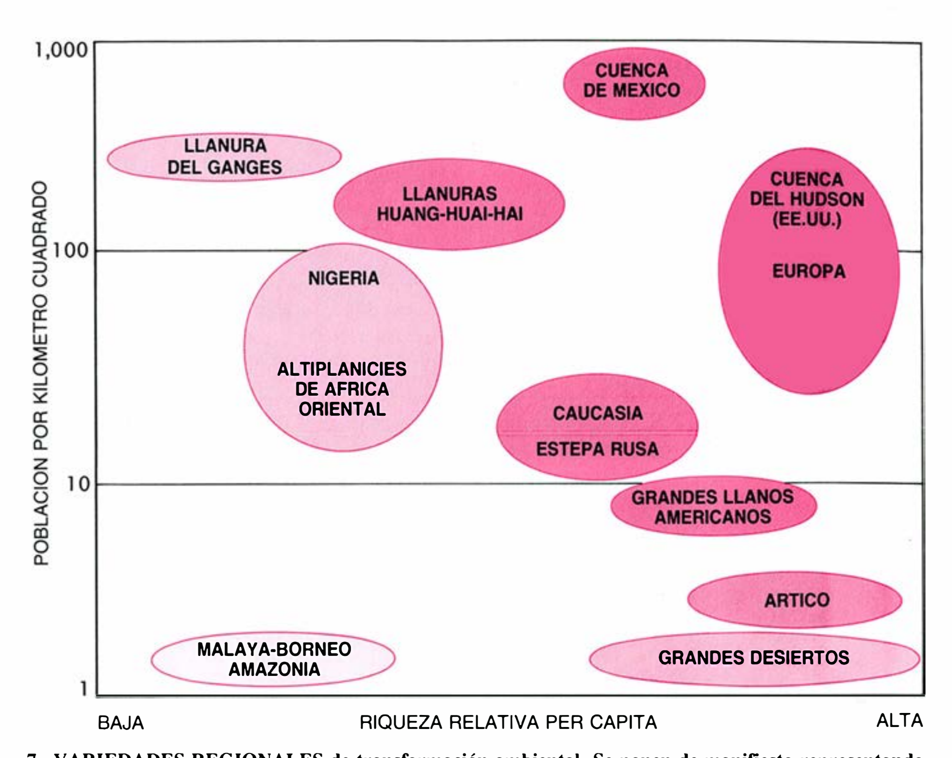
En cambio, los clásicos ambientes hostiles de la Tierra son ejemplos ilus-



6. INTERACCIONES entre el clima y los principales flujos químicos. Dichas interacciones, que dominan el cambio ambiental global durante decenas o cientos de años, están mediadas por los seres vivos y el ciclo hidrológico, en el cual se retira agua de la atmósfera por precipitación y se le devuelve por evaporación y transpiración. Los océanos desempeñan papeles de primer orden, dotando de gran inercia a los cambios climáticos y actuando como reserva de carbono y de agua. La agricultura afecta al sistema planetario, por sus efectos en los flujos de nitratos, fosfatos y compuestos de carbono. La respiración y la putrefacción liberan metano (CH_4). La combustión de combustibles fósiles descarga en la atmósfera grandes cantidades de carbono en forma de CO_2, que, como el metano, tiende a calentar el planeta. Las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y de óxidos de nitrógeno (NO_x) son causas importantes de lluvia ácida. Las emisiones industriales de clorofluorcarburos (CFC) provocan la pérdida de ozono (O_3) y contribuyen al cambio climático.

trativos de regiones con baja densidad de población, pero elevadas inversiones en técnicas muy refinadas. Podemos mencionar entre ellas las zonas árticas circumpolares, los desiertos, las plataformas de extracción de minerales y las "factorías pesqueras" en alta mar. La transformación a gran escala de estas regiones tan sólo ha resultado posible en los últimos decenios, mediante la convergencia de conocimientos, precios y técnica en inducir su desarrollo.

Algunos de los cambios ambientales asociados con tal desarrollo —vertidos de petróleo, desviaciones de ríos, transformación del paisaje— han sido objeto de amplia atención. Otros, como la contaminación atmosférica y el desplazamiento cultural, la han recibido en menor cuantía. La base de conocimiento para su gestión sigue siendo mala. Pero dado que es verosímil que, en la mayoría de las transformaciones de importancia, las protagonistas sean grandes corporaciones multinacionales, opulentas y de escaso número, las posibilidades de institucionalizar estrategias de desarrollo viable para tales regiones podrían resultar bastante buenas.



7. VARIEDADES REGIONALES de transformación ambiental. Se ponen de manifiesto representando la densidad de población en función de la riqueza relativa. Entre las regiones de baja densidad y escasa industrialización, se cuentan muchas de las fronteras de asentamiento que todavía existen en la Tierra, en las cuales acaba de dar comienzo su desarrollo agrícola. En cambio, las zonas de baja densidad e inversiones elevadas suelen corresponder a los ambientes crudos, cuyos recursos son explotados por grandes empresas que buscan combustibles y minerales. Las regiones de elevada densidad y baja renta tienen tras de sí una historia dilatada de desarrollo agrícola; el reto al que se enfrentan estriba en producir más alimentos y aliviar, al tiempo, las cargas que ya pesan sobre la tierra. La responsabilidad en el diseño de estrategias de desarrollo viable recae en las regiones ricas y de alta densidad de población, que han impuesto cargas desproporcionadas sobre el ambiente. (B. L. Turner, Robert W. Kates y el autor.)

Entre las regiones de renta baja y elevada densidad de población se cuentan la llanura del Ganges, en el subcontinente indio, y las llanuras Huang-Huai-Hai de China. En una y otra, ha venido produciéndose desde hace siglos un intenso desarrollo agrícola, al que se ha sumado en los últimos decenios el rápido ascenso del desarrollo industrial de los centros urbanos en crecimiento. La degradación del paisaje es el problema central, al ser empleadas más y más personas sobre terrenos agrícolas explotados ya a plena capacidad. A mayores, el rápido surgimiento de industria pesada en tales zonas ha creado problemas de contaminación similares a los que hubo de afrontar Europa hace varios decenios. En este caso, el desafío crítico consiste en la creación de empleo que genere renta y alivie la presión sobre la tierra, sin agravar los problemas de urbanización, ni acentuar la competición regional por las industrias de "chimenea".

La máxima responsabilidad y el mayor potencial inmediato para el diseño de estrategias de desarrollo viable se halla seguramente en las regiones de alta densidad de población y elevada renta per cápita del mundo industrializado. Como tantas veces se ha reiterado en los análisis de la pérdida de ozono estratosférico y del efecto de invernadero, la sociedad industrial avanzada ha sido responsable de una parte desproporcionada de las cargas ambientales que pesan sobre el planeta. A pesar de lo cual, durante los últimos decenios, puntos tan diferentes como Suecia, Japón y el nordeste de los Estados Unidos han logrado mejoras dignas de atención en numerosos aspectos de sus ambientes regionales. Sus bosques han crecido, las emisiones sulfurosas han disminuido y diversas especies extintas se han reintroducido con éxito. Algunas de estas victorias ambientales son, desde luego, efectos secundarios, resultados involuntarios de cambios económicos que no guardan relación entre sí. Otros son reflejo de la exportación de actividades destructoras del entorno a otros puntos del mundo, menos afortunados. De todas formas, tales regiones se están beneficiando cada vez más de estrategias sistemáticas encaminadas a mitigar el impacto del desarrollo incontrolado, y están comenzando a diseñar el tipo de ambiente donde la gente desea vivir.

¿Qué clase de ambientes proporcionarán tales estrategias? ¿Qué clase de desarrollo podrán sostener? Además de un conocimiento básico del funcionamiento del ambiente global y de la forma en que el desarrollo humano interactúa con él, se requiere conocer las consecuencias que determinadas políticas pueden suponer para el cambio ambiental.

Ya de partida, resulta imposible insistir demasiado en que una política de gestión del planeta Tierra ha de ser, ante todo y sobre todo, adaptativa [véase "Hacia un mundo viable", por William D. Ruckelhaus]. Nuestra comprensión de la ciencia subyacente a un cambio global es incompleta, y así seguirá en el futuro previsible. Continuarán apareciendo sorpresas como la del agujero estratosférico de ozono, sorpresas que exigirán adoptar acciones mucho antes de que se tenga una certidumbre científica. Nuestra comprensión de los procesos económicos y sociales que contribuyen al cambio ambiental es aún más endeble. Las previsiones al uso relativas al crecimiento demográfico y energético podrían muy bien resultar bobadas habituales. La ciencia puede ayudar, pero nuestra capacidad para crear políticas adaptativas, que nos permitan afrontar las sor-

ciente entre consumo energético y producto nacional bruto, en los Estados Unidos, desde que esa razón alcanzase su máximo valor a principios de los años veinte.

Se han desarrollado también técnicas encaminadas a la restauración de ambientes degradados por la salinización y la acidificación de las aguas, o por la minería; se emplean con eficacia a escala regional. La política adecuada consiste en confeccionar las innovaciones técnicas a la medida de las condiciones locales específicas que encontramos en diversos conflictos entre desarrollo y conservación ambiental en muchos puntos del globo.

Una tercera condición que ha de cumplir la gestión planetaria adaptativa ha de ser la construcción de mecanismos nacionales e internacionales que se encarguen de la coordinación de las funciones de gerencia. La necesidad de acuerdos internacionales formales en este campo ha quedado puesta de relieve en el Protocolo de Montreal sobre sustancias que atentan contra la capa de ozono y en la discusión de una posible ley internacional de la atmósfera. De hecho, se encuentran vigentes ya más de una docena de convenios globales para la protección del ambiente.

Y sin embargo, bajo esta superficie de apariencia ordenada, un gran número de entidades privadas, de agencias gubernamentales y de organizaciones internacionales están apresurándose a hacerse cargo de algún papel en la gestión del planeta Tierra. Mucho es lo que de recomendable tiene el pluralismo; pero, ¿no estaremos llegando al punto en que interviene la ley de rendimientos decrecientes, donde un número excesivo de reuniones, un exceso de declaraciones y un sinfín de asesores y expertos visitantes dejan un número demasiado pequeño de personas y recursos demasiado escasos para poder hacer nada efectivo? Lo que se necesita de inmediato en el plano internacional es un foro de rango ministerial, donde se puedan analizar y concretar, periódica y regularmente, las actividades de gestión ambiental, de forma muy similar a como ya se está haciendo en la política económica internacional. Lo mismo que en el caso de la política económica, la existencia de tal cumbre gubernamental, de carácter formal y de alto nivel, dedicada a los problemas de ambiente y desarrollo podría proporcionar ocasión para análisis paralelos en los que intervinieran intereses no gubernamentales y del sector privado.

Por último, la creación de una ca-



8. "PINTAR EL FUTURO" es el título de un estudio sueco, en el cual colaboraron el ecólogo Lars Emmelin y el pintor Gunnar Brusewitz, al objeto de plasmar pictóricamente el aspecto que ofrecería el paisaje escandinavo a resultas de diversas sendas de desarrollo. En estos dos dibujos, basados en los originales de Gunnar Brusewitz, se muestra el hipotético aspecto de la región de Dybäck, en el sur de Suecia, hacia el año 2015. Vemos ilustrada arriba la zona en una "Suecia solar", basada en la energía eólica y las plantaciones de biomasa; la visión de abajo correspondería a una "Suecia nuclear".

presas, será determinante en nuestra eficacia como gestores del planeta Tierra. La formación de semejante capacidad exigirá cultivar la competencia institucional y su liderazgo en cuatro campos cuando menos.

El primer requisito consiste en hacer que la información en que los individuos y las instituciones fundan sus decisiones respalde en mayor medida los objetivos de desarrollo viable. Parte de la tarea —y no es posible insistir en ello lo bastante— estriba sencillamente en apoyar las actividades de investigación científica básica y de supervisión planetaria subyacentes a nuestro conocimiento del cambio global. No menos esencial es mejorar el flujo de información implícito en los sistemas de precios, regulaciones e incentivos económicos hoy existentes. El fracaso de las actuales descripciones económicas al valorar el costo ambiental real de las actividades humanas estimula el empleo ineficiente de recursos. Los elevados precios de muchos productos agrícolas, mantenidos artificialmente, han exacerbado de forma notoria los problemas de degradación y contaminación del suelo en muchos lugares del planeta. Ciertos subsidios gubernamentales demasiado específicos han sido responsables directos de un tanto por ciento nada desdeñable de la deforestación global de nuestros días. Al diseñar políticas adaptativas para un desarrollo viable, es preciso atender a todas estas señales de información distorsionada.

El segundo requisito para una gestión planetaria adaptativa ha de ser la invención y puesta en práctica de técnicas idóneas para el desarrollo sostenido. Técnicas que no deberán consumir recursos ni producir contaminantes, sino erigirse en restauradoras del ambiente, al tiempo que ser económicamente soportables. Los artículos de este número sobre agricultura, energía e industria muestran que se han efectuado ya progresos técnicos importantes encaminados a suministrar determinados servicios a costes ambientales notablemente más baratos. Con sorprendente frecuencia, los costes económicos de las "técnicas conservacionistas" resultan ser también inferiores. Han sido las ventajas en costes, y no la preocupación por el ambiente, las responsables de reducir a la mitad el co-

pacidad de gestión adaptativa del planeta Tierra exigirá el deseo y la facultad de reflexionar continuamente sobre los valores y los objetivos que guían nuestros esfuerzos. En un sentido importante, la noción de desarrollo viable ha resultado tener más sustancia incluso de lo que los doctos miembros de la Comisión Mundial pretendían. Individuos, organizaciones e incluso naciones han tomado dicha noción como punto de partida para replantearse sus interacciones con el medio global.

Las cuestiones de deterioro ecológico llegaron a constituir uno de los puntos centrales de debate en el primer Congreso de Diputados del Pueblo en la Unión Soviética. En Kenya, un proyecto innovador patrocinado por la Academia Africana de Ciencias ha comenzado a explorar y enunciar posibilidades alternativas para el desarrollo del continente africano a lo largo del siglo XXI. En Alemania Federal, una comisión de alto nivel, en la que estaban representados todos los partidos políticos y la comunidad científica ha logrado consensuar una *Vorsorge*, una previsión, un principio-guía de la política ambiental nacional. En Suecia, cuando los científicos ambientalistas y el pintor Gunnar Brusewitz colaboraron en "pintar el futuro" que tendrían los paisajes suecos en función de las distintas vías de desarrollo, surgió un libro muy vendido en todo el país, que desempeño un papel central en el debate político.

La fuerza que estas y similares exploraciones que se están desarrollando en todo el mundo puedan tener para guiar la transformación humana del medio ambiente dista de estar clara. Pero no cabe duda de que, contra lo que se esperaba, todas estas exploraciones reflejan que está aflorando el compromiso de ponerse manos a la obra en la gestión responsable del planeta Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MAJOR BIOGEOCHEMICAL CYCLES AND THEIR INTERACTIONS. Dirigido por Bert Bolin y Robert B. Cook, John Wiley & Sons, 1983.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE BIOSPHERE. Dirigido por William C. Clark y R. E. Munn. Cambridge University Press, 1986.

OUR COMMON FUTURE. World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, 1987.

RESOURCES AND WORLD DEVELOPMENT. Dirigido por Digby J. McLaren y Brian J. Skinner. John Wiley & Sons, 1987.

THE EARTH AS TRANSFORMED BY HUMAN ACTION. Dirigido por B. L. Turner. Cambridge University Press, en prensa.

Una atmósfera cambiante

La actividad humana está alterando la compleja mezcla de gases que forman la atmósfera. Algunos efectos, como la lluvia ácida y la contaminación, han alcanzado ya niveles preocupantes; quizá no sean ésas las únicas sorpresas

Thomas E. Graedel y Paul J. Crutzen

La atmósfera terrestre nunca ha estado libre de cambios. Su composición, temperatura y capacidad de autolimpieza han variado desde que se formó el planeta. Pero el ritmo adquirido en los dos últimos siglos ha sido clamoroso: la composición de la atmósfera, en particular, ha cambiado con una celeridad desconocida en cualquier otra época de la historia humana.

Los efectos de los cambios que se están produciendo, y que se manifiestan con creciente claridad, abarcan la deposición ácida por la lluvia y otros procesos, la corrosión de los materiales, la bruma urbana y la debilitación del escudo de ozono estratosférico (O_3) que protege la Tierra de la dañina radiación ultravioleta. Los científicos que estudian la atmósfera esperan también que el planeta no tarde en calentarse (produciendo alteraciones climáticas potencialmente espectaculares) debido a la intensificación del efecto de invernadero: el calentamiento de la Tierra por los gases que absorben radiación infrarroja, emitida por la superficie del planeta calentada por el Sol, y la envían luego a la Tierra.

Por sorprendente que parezca, fenómenos tan importantes no tienen su origen en modificaciones de los componentes atmosféricos principales. Dejando aparte el contenido en vapor de agua, que varía de manera muy amplia, las concentraciones de los gases que constituyen más del 99,9 por ciento de la atmósfera —nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y los gases nobles completamente inertes— se han mantenido casi constantes durante mucho más tiempo que el que los seres humanos llevan sobre la Tierra. Los efectos se deben, en gran parte, a variaciones, aumentos sobre todo, de los niveles de algunos de los componentes atmosféricos menos abundantes, o gases traza. Citaremos el dióxido de azufre (SO_2), dos óxidos de nitrógeno que responden a la denominación colectiva de NO_x —el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2)— y varios clorofluorcarburos o halocarburos (compuestos que contienen cloro, flúor, carbono y algunas veces hidrógeno).

El dióxido de azufre, por ejemplo, rara vez llega a 50 partes por mil millones de la atmósfera, aun cuando las emisiones del mismo sean las mayores, y, pese a ello, contribuye a la deposición ácida, a la corrosión de piedras y metales y a la incómoda reducción de visibilidad. Los compuestos NO_x, que son igualmente escasos, revisten interés en la formación de la deposición ácida y de la bruma fotoquímica, como se conoce el producto de reacciones químicas desencadenadas en la atmósfera por la radiación solar. Los halocarburos, que en cuanto grupo constituyen apenas una parte en mil millones de la atmósfera, son los responsables principales de la erosión de la capa de ozono estratosférico. Además, los crecientes niveles de los clorofluorcarburos, junto con el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y dióxido de carbono (CO_2) —de lejos el más abundante de los gases traza, con 350 partes por millón— están intensificando el efecto de invernadero.

El radical hidroxilo (OH), fragmento molecular altamente reactivo, influye también en la actividad atmosférica, aun cuando sea mucho más escaso que otros gases, con una concentración de menos de 0,0001 partes en mil millones. El hidroxilo, sin embargo, cumple una función distinta: contribuye a limpiar la atmósfera. Su concentración en ella podría disminuir en el futuro.

La fluctuación en la concentración de los componentes atmosféricos obedece, en parte, a las variaciones que se producen en la tasa de emisión de las fuentes naturales. Los volcanes, por ejemplo, pueden arrojar a la troposfera (los 10 a 15 kilómetros más bajos de la atmósfera) y a la estratosfera (que se extiende aproximadamente desde 10 a 50 kilómetros sobre el suelo) gases que contienen azufre y cloro. Sin embargo, sigue en pie el hecho de que las actividades de los seres humanos dan cuenta de los cambios más rápidos en los últimos 200 años. Actividades entre las que hemos de señalar la combustión de carburantes fósiles (carbón y petróleo) para producir energía, ciertas prácticas industriales y agrícolas, la combustión de biomasa (quema de vegetación) y la deforestación.

Hasta aquí está claro. Pero, ¿cuáles

1. QUEMA DE VEGETACION, práctica común en los trópicos. La combustión desprende hollín y gases diversos; sobre todo, dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, óxido nítrico (NO) y dióxido nítrico (NO_2). Esta y otras actividades humanas —pensemos en la combustión de carburantes fósiles— son responsables, en gran parte, de los espectaculares aumentos de las concentraciones de muchos gases traza en la atmósfera a lo largo de los dos últimos siglos. Aumentos que provocan perturbaciones del ambiente, tales como la deposición ácida, la bruma fotoquímica urbana (el "smog") y la destrucción parcial de la capa de ozono estratosférico que absorbe la radiación ultravioleta, de efectos devastadores. Se espera también un calentamiento del planeta, secuela de la acumulación de gases de invernadero que aprisionan la radiación infrarroja.

THOMAS E. GRAEDEL y PAUL J. CRUTZEN son pioneros en el estudio de la química atmosférica. Graedel es emérito de la plantilla técnica de los laboratorios AT&T Bell. Fue adelantado en el estudio de la química del azufre en fase gaseosa, las interacciones químicas que se producen en las gotas de lluvia y las reacciones que toman parte en la corrosión por la atmósfera. Crutzen, coautor de la teoría del "invierno nuclear", dirige la división de química atmosférica del Instituto de Química Max Planck en Mainz, Alemania Federal, y es profesor de la Universidad de Chicago. Los estudios que inició a comienzos del decenio de 1970 sobre los procesos fotoquímicos en la troposfera y estratosfera ayudaron a establecer el campo de la moderna química atmosférica.



son las actividades humanas que generan cada clase de emisiones? ¿Por qué la alteración de las concentraciones de los gases traza da lugar a semejante rosario de efectos? ¿En qué medida se han agravado los problemas y qué consecuencias arrastran para el planeta? Aunque la respuesta cabal a tales cuestiones está todavía en el alero, los esfuerzos multidisciplinarios de químicos, meteorólogos, físicos solares y espaciales, geofísicos, biólogos, ecólogos y otros están avanzando con pie firme.

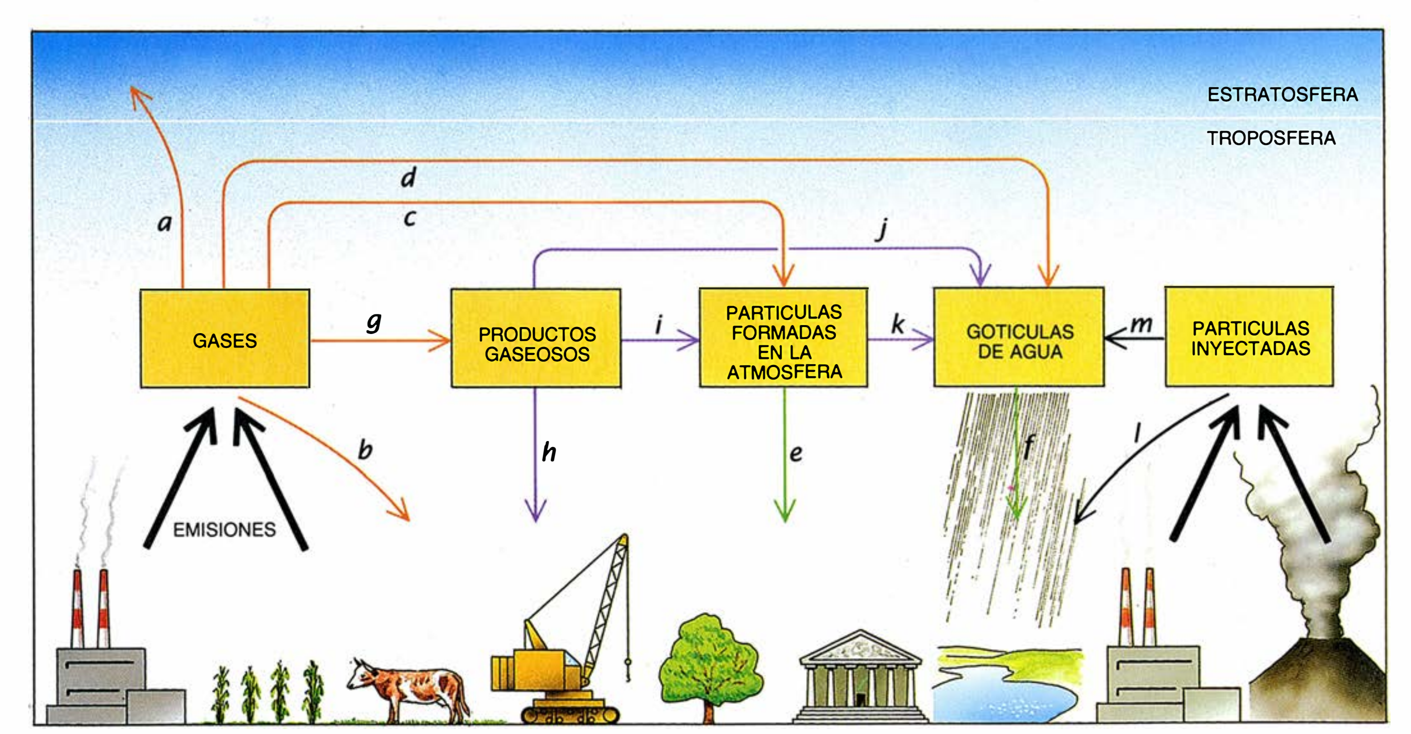
La colaboración interdisciplinaria se hace imprescindible, dada la complejidad de los factores que rigen el destino de los gases en la atmósfera y sus interacciones con la biosfera, amén de la falta de conocimientos sobre ello. Así, las reacciones químicas que un gas experimenta en la atmósfera pueden variar a tenor de la mezcla local de gases y partículas, la temperatura, la intensidad de la radiación solar, la presencia de diferentes clases de nubes o precipitación y la distribución de vientos (que arrastran a los productos químicos horizontal y verticalmente). Las reacciones, a su vez, determinan el tiempo que un gas permanece en la atmósfera y, con ello, si el gas o sus productos finales producen efectos globales o más localizados sobre el entorno.

Frutos de esas investigaciones ha sido una mejor comprensión de las emisiones producidas por determinadas actividades humanas. Se sabe que la combustión de carburantes fósiles para la producción de energía libera cantidades sustanciales de dióxido de azufre (sobre todo si se usa carbón), óxidos de nitrógeno (que se forman cuando se calientan el nitrógeno y el oxígeno del aire) y dióxido de carbono. Si la combustión es incompleta, genera también monóxido de carbono (CO), cierto número de hidrocarburos (entre ellos, metano) y hollín (partículas de carbono). Otras actividades industriales arrojan cantidades adicionales de dióxido de azufre (un ejemplo es la siderurgia) o inyectan en la atmósfera halocarburos o metales tóxicos.

Ciertas prácticas agrícolas emiten, asimismo, gases diversos. La quema de bosques y praderas en la sabana de las regiones tropicales y subtropicales, para crear pastizales o cultivos, origina grandes cantidades adicionales de monóxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno. Además, el suelo descubierto después de talar los bosques emite óxido nitroso, como lo hacen también los fertilizantes ricos en nitrógeno que abonan los campos. La cría de animales domésticos constituye otra fuente importante de metano (liberado por las bacterias anaerobias del tubo digestivo del ganado y otros rumiantes), como lo es el cultivo de arroz, dieta habitual de muchos habitantes de los trópicos y subtrópicos.

Las investigaciones recientes han posibilitado una mejor definición de los efectos producidos por el aumento de las emisiones antropogénicas. En ese sentido, sabemos ya que la "lluvia ácida" (fenómeno muy estudiado y en el que se inscriben también nieve, nieblas y rocío ácidos) se forma principalmente como un producto secundario de interacciones atmosféricas en las que toman parte los gases NO_x y el dióxido de azufre. A través de distintas reacciones, la combinación con el radical hidroxilo es una, esos gases se convierten, en cuestión de días, en ácido nítrico (HNO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), ambos fácilmente solubles en agua. Cuando las gotas acidificadas caen a la superficie terrestre, forman la lluvia ácida.

Como las gotas de agua se eliminan enseguida de la atmósfera, la lluvia ácida no constituye un fenómeno global,



2. DESTINO DISPAR DE LAS EMISIONES en la atmósfera. Un gas (*flechas anaranjadas*) inerte e insoluble en agua (*a*) se difundirá en toda la troposfera (los 10 a 15 kilómetros más bajos) y, en algunos casos, hasta la estratosfera, que se extiende de 10 a 50 kilómetros por encima de la superficie, aunque una parte puede ser absorbida por el suelo y las superficies acuáticas (*b*). Si el gas es soluble, puede, por contra, disolverse en la humedad de las partículas (*c*) o en gotas de agua (*d*), principalmente en las nubes. Las partículas y las gotas transportan, entonces, el gas hasta el suelo (*flechas verdes*) directamente (*e*) o en forma de lluvia, nieve, niebla o rocío (*f*). La mayoría de los gases son lo suficientemente reactivos para experimentar cambios en la atmósfera (*g*), impulsados sobre todo por la interacción con el radical hidroxilo (OH). Los productos gaseosos resultantes (*flechas púrpura*) se depositan a veces directamente en el suelo (*h*); ahora bien, como suelen ser más solubles que sus precursores, se incorporan más fácilmente en partículas mojadas (*i*) y, directamente (*j*) o indirectamente (*k*), en gotas de agua. Los productos gaseosos tienden, por ello, a ser eliminados (*e*,*f*) muy pronto y, a diferencia de sus predecesores, es mucho menos probable que se difundan por encima de la troposfera. El destino de las partículas inyectadas (*flechas negras*) es similar al de los gases. Pueden depositarse directamente (*l*), o incorporarse en el agua (*m*), para volver a la Tierra en forma de precipitación (*f*).

sino regional o continental. En cambio, la vida media de otros gases traza, entre ellos el metano, el dióxido de carbono, los halocarburos y el óxido nitroso, es mucho más prolongada [*véase el recuadro inferior de la figura 3*]; significa ello que estos gases se dispersan de manera bastante uniforme a través de la atmósfera, causando efectos globales.

Desde el comienzo de la revolución industrial, a mediados del siglo XVIII, la acidez de la precipitación (medida por la concentración de iones hidrógeno) ha aumentado en muchos lugares. Por ejemplo, desde 1900 se ha cuadruplicado en el nordeste de los EE.UU., siguiendo el aumento de las emisiones de dióxido de azufre y gases NO_x. En otros lugares de las zonas industrializadas del mundo, se han encontrado aumentos similares. Se ha detectado también lluvia ácida en los trópicos, sin apenas industria; allí se debe, sobre todo, al desprendimiento de gases NO_x e hidrocarburos por combustión de la biomasa.

La deposición ácida no es el único camino a través del cual los ácidos sulfúrico y nítrico de la troposfera encuentran la superficie terrestre. Los ácidos se depositan "secos", en forma de gases o componentes de partículas microscópicas. La realidad es que hay un creciente conjunto de pruebas que atribuyen a la deposición seca los mismos problemas ambientales que produce la húmeda.

La deposición ácida somete muchos ecosistemas a graves tensiones. Aunque queda mucho por conocer sobre las interacciones específicas entre esa deposición y la fauna lacustre, constitución de los suelos y diferentes tipos de vegetación, se sabe que la deposición ácida ha aumentado la acidez de los lagos de Escandinavia, el nordeste de los EE.UU. y el sudeste de Canadá, restringiendo el tamaño y la diversidad de las poblaciones de peces. Deposición que aparece involucrada en los daños que se han descubierto en los bosques de ciertas partes de Europa y del nordeste de los EE.UU.

Hay pocas dudas de que los ácidos depositados desde la troposfera contribuyan también a la corrosión de objetos al aire libre, edificios y obras de arte, sobre todo en las zonas urbanas; sólo en los Estados Unidos, esa agresión cuesta, al año, decenas de miles de millones de dólares en reparaciones y repuestos de equipos. Las partículas que contienen sulfato (SO_4^{2-}) producen además otros efectos. Al difundir eficazmente la luz, reducen la visibilidad; y, por su influencia sobre el albedo de las nubes, pueden tener importantes implicaciones con respecto al clima.

REACCIONES QUIMICAS EN LA ATMOSFERA

LOS OXIDANTES COMO DETERGENTES. Las especies moleculares que inician la mayoría de las reacciones atmosféricas ("oxidantes" en la terminología de los químicos) se pueden considerar como detergentes porque transforman gases en productos solubles en agua, facilitando así su eliminación en forma de precipitación. El ozono (O_3), un importante oxidante, participa también en la formación de otro detergente: el radical hidroxilo (OH), que interacciona con casi todas las especies moleculares de la atmósfera. Muchos de los gases traza que se han emitido a la atmósfera estarían todavía en ella,si no fuera por estas substancias. El radical hidroxilo se forma después de que la luz ultravioleta (hv) disocie el ozono, dejando libre un átomo de oxígeno (O*) altamente energético, y por ello altamente reactivo, que se combina después con una molécula de agua:

a) $O_3 \xrightarrow{hv} O^* + O_2$ b) $O^* + H_2O \longrightarrow 2OH$

OZONO ESTRATOSFERICO: FORMACION Y DESTRUCCION. El ozono se forma cuando las moléculas de oxígeno (O_2) se disocian por la radiación ultravioleta y los átomos de oxígeno resultantes se combinan con otra molécula de oxígeno

a) $O_2 \xrightarrow{hv} O + O$ b) $O + O_2 \longrightarrow O_3$

Los átomos de cloro de los compuestos clorofluorcarburos lanzados a la atmósfera desempeñan un papel fundamental en uno de los ciclos catalíticos más eficaces para la destrucción del ozono estratosférico. El ciclo comienza con la rotura de una molécula de ozono por el cloro atómico y la formación de monóxido de cloro (ClO) y oxígeno molecular:

a) $Cl + O_3 \longrightarrow ClO + O_2$

El monóxido de cloro reacciona entonces con un átomo de oxígeno (formado por fotodisociación de otra molécula de ozono) y libera el cloro, que puede, de nuevo, iniciar el ciclo:

b) $ClO + O \longrightarrow Cl + O_2$

Los óxidos de nitrógeno destruyen el ozono; pueden también oponerse a ese ciclo. Por ejemplo, el dióxido de nitrógeno puede eliminar de la circulación al monóxido de cloro, combinándose con él para formar nitrato de cloro ($ClNO_3$).

La bruma fotoquímica que vela las ciudades y sus arrabales es otra consecuencia negativa de la vida moderna. Con ese tecnicismo se alude a la mezcla indeseable de gases que se forma en la baja troposfera cuando la radiación solar actúa sobre emisiones antropogénicas (sobre todo los gases NO_x y los hidrocarburos de los escapes de vehículos) para producir gases reactivos que interesan o lesionan los organismos.

El ozono, uno de los productos más importantes de tales reacciones fotoquímicas, es, por sí solo, causa principal de la irritación de los ojos producida por dicha bruma, de dificultades respiratorias y daños a los árboles y a las cosechas. La gravedad de esa bruma se estima, por tanto, atendiendo a las concentraciones de ozono a nivel del mar. En otras palabras, la misma molécula de oxígeno triatómico que resulta decisiva para absorber la radiación ultravioleta en la estratosfera, donde se concentra alrededor del 90 por ciento del ozono atmosférico, representa un problema cuando se acumula en exceso cerca de la superficie terrestre.

A finales del siglo XIX, los investigadores comenzaron a medir los niveles de ozono en la atmósfera; lo hicieron primero desde el suelo y después en la propia atmósfera, ayudados por complicados equipos que se elevan hasta la misma. De acuerdo con datos de primera hora, el nivel "natural" de ozono en la proximidad del suelo, en un punto de medida en Europa hace aproximadamente un siglo, era de unas 10 partes por mil millones. Hoy, las concentraciones habituales a ras del suelo en Europa occidental se han multiplicado de dos a cuatro veces. Y en Europa occidental, California, la parte oriental de los EE.UU. y Australia abundan ya los registros frecuentes de concentraciones que decuplican el nivel natural.

La bruma fotoquímica empieza a dejarse sentir en amplias regiones de los trópicos y subtrópicos; la trae la quema periódica de gramíneas en las sabanas; hasta una vez cada año se prende fuego a los mismos territorios. Esta práctica desprende grandes cantidades de precursores de la bruma fotoquímica. Por ser abundante e intensa la radiación solar en esas regiones, y desarrollarse rápidamente las reacciones fotoquímicas, los niveles de ozono no tardan en quintuplicar la concentración normal. El crecimiento de la población en los trópicos y subtrópicos provocará una mayor presencia allí del aire insano. Una

GAS	EFECTO DE INVERNADERO	DESTRUCCION DE OZONO ESTRATOSFERICO	DEPOSICION ACIDA	BRUMA FOTO-QUIMICA	CORROSION	DISMINUCION DE LA VISIBILIDAD	REDUCCION DE LA CAPACIDAD ATMOSFERICA DE AUTOLIMPIEZA
MONOXIDO DE CARBONO (CO)							+
DIOXIDO DE CARBONO (CO_2)	+	+/−					
METANO (CH_4)	+	+/−					+/−
NO_x: OXIDO NITRICO (NO) Y DIOXIDO DE NITROGENO (NO_2)		+/−	+	+		+	−
OXIDO NITROSO (N_2O)	+	+/−					
DIOXIDO DE AZUFRE (SO_2)	−		+		+	+	
HALOCARBUROS	+	+					
OZONO (O_3)	+			+			−

GAS	PRINCIPALES FUENTES ANTROPOGENICAS	EMISION ANTROPOGENICA/ EMISION TOTAL POR AÑO (MILLONES DE TONELADAS)	TIEMPO MEDIO DE PERMANENCIA EN LA ATMOSFERA	CONCENTRACION MEDIA HACE 100 AÑOS (PARTES POR MIL MILLONES)	CONCENTRACION ACTUAL APROXIMADA (PARTES POR 10^{-9})	CONCENTRACION EXTRAPOLADA EN EL AÑO 2000 (PARTES POR 10^{-9})
MONOXIDO DE CARBONO (CO)	Combustión de carburantes fósiles y de biomasa	700/2000	Meses	?, Hem. N. 40 a 80, Hem. S. (Atmósferas limpias)	100 a 200, Hem. N. 40 a 80, Hem. S. (Atmósferas limpias)	Probablemente aumentando
DIOXIDO DE CARBONO (CO_2)	Combustión de carburantes fósiles, deforestación	5500/~5500	100 años	290.000	350.000	400.000 a 550.000
METANO (CH_4)	Arrozales, ganadería, vertederos, producción de combustibles fósiles	300 a 400/550	10 años	900	1700	2200 a 2500
GASES NO_x	Combustión de carburantes fósiles y de biomasa	20 a 30/ 30 a 50	Días	0,001 a ? (Limpia a industrial)	0,001 a 50 (Limpia a industrial	0,001 a 50 (Limpia a industrial)
OXIDO NITROSO (N_2O)	Fertilizantes nitrogenados, deforestación, combustión de biomasa	6/25	170 años	285	310	330 a 350
DIOXIDO DE AZUFRE (SO_2)	Combustión de carburantes fósiles, beneficiado de minerales	100 a 130/ 150 a 200	Días-semanas	0,03 a ? (Limpia a industrial)	0,03 a 50 (Limpia a industrial)	0,03 a 50 (Limpia a industrial)
HALO-CARBUROS	Pulverizadores, refrigerantes, espumas	~1/1	60 a 100 años	0	Aproximadamente 3 (átomos de cloro)	2,4 a 6 (átomos de cloro)

3. SE CATALOGAN LOS GASES TRAZA y las perturbaciones ambientales con las que están relacionados (*arriba*). Los signos de adición indican contribución al efecto; los de sustracción, mejora. Algunas veces, el efecto de un gas varía; se señala con el signo doble (+/−). En particular, los efectos del dióxido de carbono, de los gases NO_x y del óxido nitroso sobre la destrucción del ozono estratosférico dependen de la altura. El metano suele mejorar el efecto, excepto en el agujero de ozono, y su tendencia a minar la capacidad de autolimpiado de la atmósfera (reduciendo la abundancia de hidroxilo) es diferente en el norte del sur; el metano limita la autolimpieza en el hemisferio Sur, pero tiene un efecto opuesto en el hemisferio Norte. Se espera que las concentraciones de muchos gases, que se expresan en partes por mil millones, crezca de forma apreciable de aquí a 40 años (*abajo*), si las emisiones antropogénicas continúan aumentando. Se dan las estimaciones globales de los gases cuya vida media se cifra en años. Las concentraciones de NO_x y SO_2 sobre las zonas industrializadas puede no aumentar mucho en 40 años, pero sí se espera que crezca el número de zonas contaminadas. Las concentraciones de halocarburos se ofrecen en función de los átomos de cloro, porque las moléculas suelen contener más de un átomo de cloro, destructor del ozono.

perspectiva nada halagüeña: la composición de sus suelos podría provocar una vulnerabilidad de los ecosistemas a la bruma fotoquímica más inerme que la capacidad de resistencia de los ecosistemas de latitudes medias.

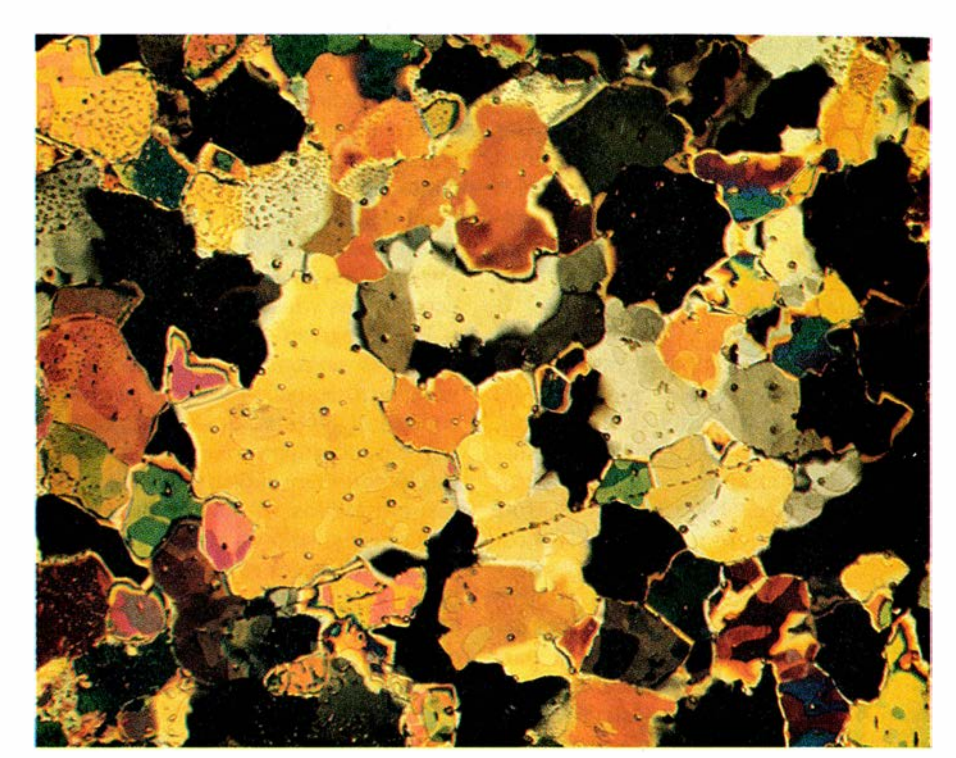
Aunque una disminución del ozono en la vecindad del suelo beneficiaría a las regiones contaminadas, cualquier merma del estratosférico despierta preocupación, porque el aumento resultante de radiación ultravioleta que llegaría a la Tierra podría producir muchos y graves efectos. Podría elevar la frecuencia de cáncer de piel y cataratas en los seres humanos y podría dañar las cosechas y el fitoplancton, o plantas microscópicas que constituyen la base de la cadena trófica en los océanos.

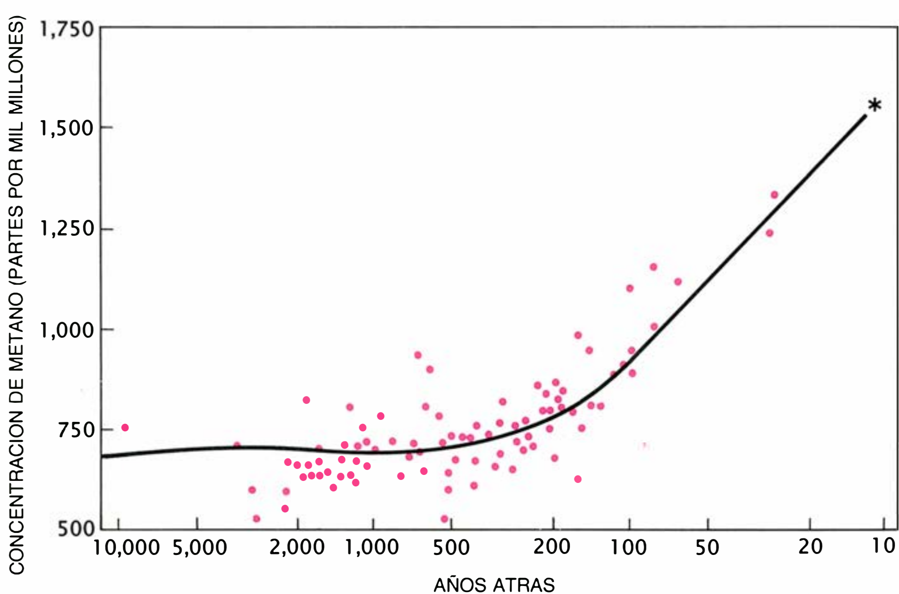
Hasta ahora, el grado de disminución del ozono estratosférico ha adquirido tintes espectaculares sobre la Antártida, donde ha aparecido, cada primavera austral desde 1975, un "agujero", esto es, una región de pérdida de ozono cada vez más grave. A lo largo de los últimos diez años, los niveles primaverales de ozono estratosférico sobre la Antártida han caído en torno a un 50 por ciento [véase "El agujero de ozono antártico", por Richard S. Stolarski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1988]. Se halla en fase preliminar una valoración global de la capa estratosférica de ozono, aunque parece que en los últimos 20 años comenzaron a producirse mermas del 2 al 10 por ciento durante el verano y principios de primavera en las latitudes medias y altas del hemisferio Norte, con una reducción mayor en las latitudes más altas.

Se sabe con bastante seguridad que los principales agentes responsables de la reducción del ozono son los halocarburos, principalmente el CFC-11 ($CFCl_3$) y el CFC-12 (CF_2Cl_2). Se trata de productos químicos antropogénicos cuyas emisiones y concentraciones en la atmósfera han aumentado muy deprisa desde su introducción varios decenios atrás; los usamos sin tasa como refrigerantes, propelentes de pulverizadores, disolventes y soplantes en la producción de espumas; empleo que obedece a lo que al principio parecía una excelente propiedad de los mismos: virtualmente inertes en la baja atmósfera, carecen de toxicidad directa para los organismos vivientes.

Para nuestra desgracia, ese carácter inerte capacita a los halocarburos para llegar inalterados hasta la estratosfera. Quedan allí sometidos a una intensa radiación ultravioleta, que rompe sus moléculas y libera átomos de cloro que pueden destruir el ozono catalizando su conversión en oxígeno molecular. (Los catalizadores aceleran las reacciones químicas, pero al final reaparecen libres e inalterados.) De hecho, cada átomo de cloro elimina muchos miles de moléculas de ozono. Debido sobre todo a las emisiones de halocarburos, el nivel de compuestos clorados capaces de destruir el ozono en la estratosfera es ahora de cuatro a cinco veces mayor de lo normal y aumenta a razón de un 5 por ciento cada año. Esas modificaciones ponen de manifiesto el efecto profundo que la acción del hombre ejerce sobre la estratosfera.

El ozono estratosférico (O_3) se forma inicialmente cuando una molécula de oxígeno (O_2) absorbe radiación de corta longitud de onda, que la rompe en dos átomos de oxígeno (O); cada





4. CRISTALES DE HIELO de una muestra tomada del casquete de hielo groenlandés, fotografiados mediante luz polarizada. Tienen unos mil años de antigüedad. Las burbujitas de aire visibles son portadoras de pistas sobre las antiguas concentraciones de gases traza, entre ellos, los gases de invernadero dióxido de carbono y metano. Los estudios llevados a cabo sobre los testigos de hielo de Groenlandia y de la Antártida indican que la concentración media global de metano se mantuvo constante, en alrededor de 700 partes por mil millones, entre 10.000 y 300 años atrás, iniciando después un espectacular ascenso, hace unos 100 años (*abajo*). Los puntos rojos representan datos del hielo; el asterisco simboliza el valor medio global hacia fines del decenio de 1970: unas 1500 partes por mil millones. La microfotografía fue realizada por Chester C. Langway, Jr., adscrito a la Universidad del Estado de Nueva York en Buffalo.

átomo se combina, entonces, con otra molécula de oxígeno para formar ozono. Generalmente, las reacciones fotoquímicas catalizadas por los gases NO_x eliminan el ozono a una velocidad igual a la de su formación. Los ciclos catalíticos del cloro, de creciente importancia en la atmósfera, perturban este equilibrio natural y dan por resultado una pérdida de ozono.

En la Antártida, y en menor grado en el Artico, las temperaturas muy bajas aceleran los ciclos catalíticos del cloro al eliminar óxidos de nitrógeno, que oponen dura resistencia a los mismos. (Por extraño que nos parezca, aunque los gases NO_x pueden destruir el ozono, su presencia en la estratosfera palía frecuentemente la destrucción que del mismo cataliza el cloro.) Junto con las moléculas de agua, los gases NO_x se congelan para formar partículas, constituyendo las nubes estratosféricas polares. Y lo que es peor: las partículas de estas nubes facilitan ciertas reacciones químicas que liberan cloro de compuestos que, por sí solos, no reaccionan con el ozono, como el ácido clorhídrico (HCl) y el nitrato de cloro ($ClNO_3$).

Aun cuando las emisiones de halocarburos cesaran hoy mismo, las reacciones químicas que producen la destrucción del ozono estratosférico continuarían durante al menos un siglo. La razón es sencilla: los compuestos permanecen en la atmósfera todo ese tiempo, y proseguirían difundiéndose hasta la estratosfera desde su reserva troposférica mucho después de que hubieran cesado las emisiones.

La destrucción del ozono estratosférico global parece ser obra principalmente de una clase de productos industriales —los halocarburos—, pero hay otras emisiones que se combinan para despertar al espectro amenazador de un rápido calentamiento de invernadero en la Tierra. Desconocemos hasta qué punto podrían elevarse las temperaturas en los años venideros. Sí está claro que los niveles de gases traza absorbentes de infrarrojo, tales como el dióxido de carbono, el metano, los halocarburos y el óxido nitroso, han crecido de manera espectacular en los últimos decenios, haciendo inevitable un calentamiento adicional.

La absorción de calor en la vecindad de la superficie del planeta por gases traza emitidos de forma natural constituye un proceso vital: sin él, el planeta, demasiado frío, se haría inhabitable. Pese a ello, la perspectiva de un brusco aumento de temperatura de sólo unos grados mueve a inquietud porque nadie puede predecir con exactitud sus efectos ambientales, verbigracia, las variaciones precisas de la precipitación en todo el mundo o las del nivel del mar. Se tratará, no obstante, de efectos probablemente rápidos, que imposibilitarán la adaptación de los ecosistemas y las sociedades humanas.

Ese progreso extraordinario de los recientes aumentos de los gases de invernadero se hace evidente cuando se comparan los niveles actuales con los del pasado lejano. Se han realizado esos cotejos a propósito de distintos gases; entre ellos, el dióxido de carbono —que por sí solo da cuenta de más de la mitad del calor absorbido por las especies traza— y el metano, que es un absorbente de infrarrojo mucho más eficaz que el dióxido de carbono, aunque bastante menos abundante.

Podemos reconstruir la historia del dióxido de carbono y del metano merced a las concentraciones halladas en las burbujas de aire que han quedado aprisionadas en los hielos de lugares perpetuamente fríos (Antártida y Groenlandia). De larga vida, los gases se dispersan de forma bastante homogénea en la atmósfera; las muestras polares revelan, pues, con aproximación, las concentraciones medias globales de eras anteriores.

Los análisis de las burbujas de las muestras de hielo indican que las concentraciones de dióxido de carbono y metano se mantuvieron constantes desde el final del último período glacial, hace unos 10.000 años, hasta hace unos 300 años, en 260 partes por millón el primero y 700 partes por mil millones el metano. Hace unos 300 años, los niveles de metano comenzaron a subir; hace unos 100 años, los niveles de ambos gases ascendieron vertiginosamente hasta sus presentes valores, de 350 partes por millón para el dióxido de carbono y 1700 partes por mil millones para el metano. Además, las mediciones directas, realizadas en todo el mundo a lo largo de los últimos 10 años, ponen de manifiesto que los niveles de metano atmosférico crecen más deprisa que los de dióxido de carbono, con una tasa notablemente alta: un 1 por ciento anual.

El aumento de ambos gases en el siglo xx debe atribuirse, en buena parte, a la contribución, cada vez más importante, de la actividad humana en las emisiones. Del dióxido de carbono, las fuentes principales son la combustión de carburantes fósiles y la deforestación tropical; del metano, el cultivo de arroz, la ganadería, la combustión de biomasa en los bosques tropicales y sabanas, la actividad microbiana en vertederos municipales y el desprendimiento de gas durante la extracción y distribución de carbón, petróleo y gas natural. Conforme la población del mundo aumente durante el próximo siglo —y con ella la demanda de energía, arroz y productos cárnicos— la concentración atmosférica de metano podría duplicarse. El calentamiento climático causado por éste y otros gases traza podría muy bien acercarse al causado por el dióxido de carbono.

¿Cuál es la evolución previsible de los demás gases traza? Los autores, entre otros, han extrapolado del pasado y del presente para pronosticar el futuro, contando con el crecimiento estimado de la población y del consumo de energía. De acuerdo con los cálculos, cabe esperar incrementos de las concentraciones en la atmósfera de casi todos los gases traza en los próximos 100 años, si no se instituyen nuevas técnicas y no se empeñan esfuerzos a gran escala para la conservación de la energía, y así restringir la dependencia del carbón, hoy principal fuente de energía del mundo, combustible con alto contenido de azufre y desventajoso desde el punto de vista del medio ambiente.

Dentro de ese contexto, y en colaboración con varios centros, hemos abordado las emisiones de dióxido de azufre en el nordeste de los EE.UU. y en Europa durante el pasado: las estimaciones, fundadas en las tasas de emisión, correspondían a fechas precedentes a la segunda mitad de la década de 1960. Con ese punto de apoyo, conjeturamos el futuro de esas regiones y de llanura india del Ganges, zona de escaso desarrollo industrial [*véase la figura 6*]. Las estimaciones históricas relativas a los EE.UU. evidencian un aumento pronunciado de las concentraciones de dióxido de azufre entre 1890 y 1940, que corre paralelo al florecimiento industrial "de chimenea" y a la construcción de nuevas centrales térmicas. La cantidad de dióxido de azufre se estabilizó entonces, para caer en el decenio de 1960 y a principios del de 1970. En gran parte, la disminución refleja el crecimiento en el uso del petróleo (cuyo contenido de azufre es bajo), así como el éxito de la legislación sobre reducción de las emisiones de azufre en pro de un aire más limpio.

Las concentraciones de dióxido de azufre sobre Europa aumentaron apre-

ciablemente entre 1890 y mediados de nuestro siglo. Se mantuvieron luego sin disminución notable porque, hasta hace poco, las medidas de control de emisiones fueron menos vigorosas que en los EE.UU. En la llanura del Ganges, donde la industrialización es un fenómeno bastante reciente, la concentración de dióxido de azufre ha subido, en algunos lugares, desde valores despreciables en 1890 hasta niveles que se están aproximando a los de la atmósfera sobre el nordeste de los EE.UU.

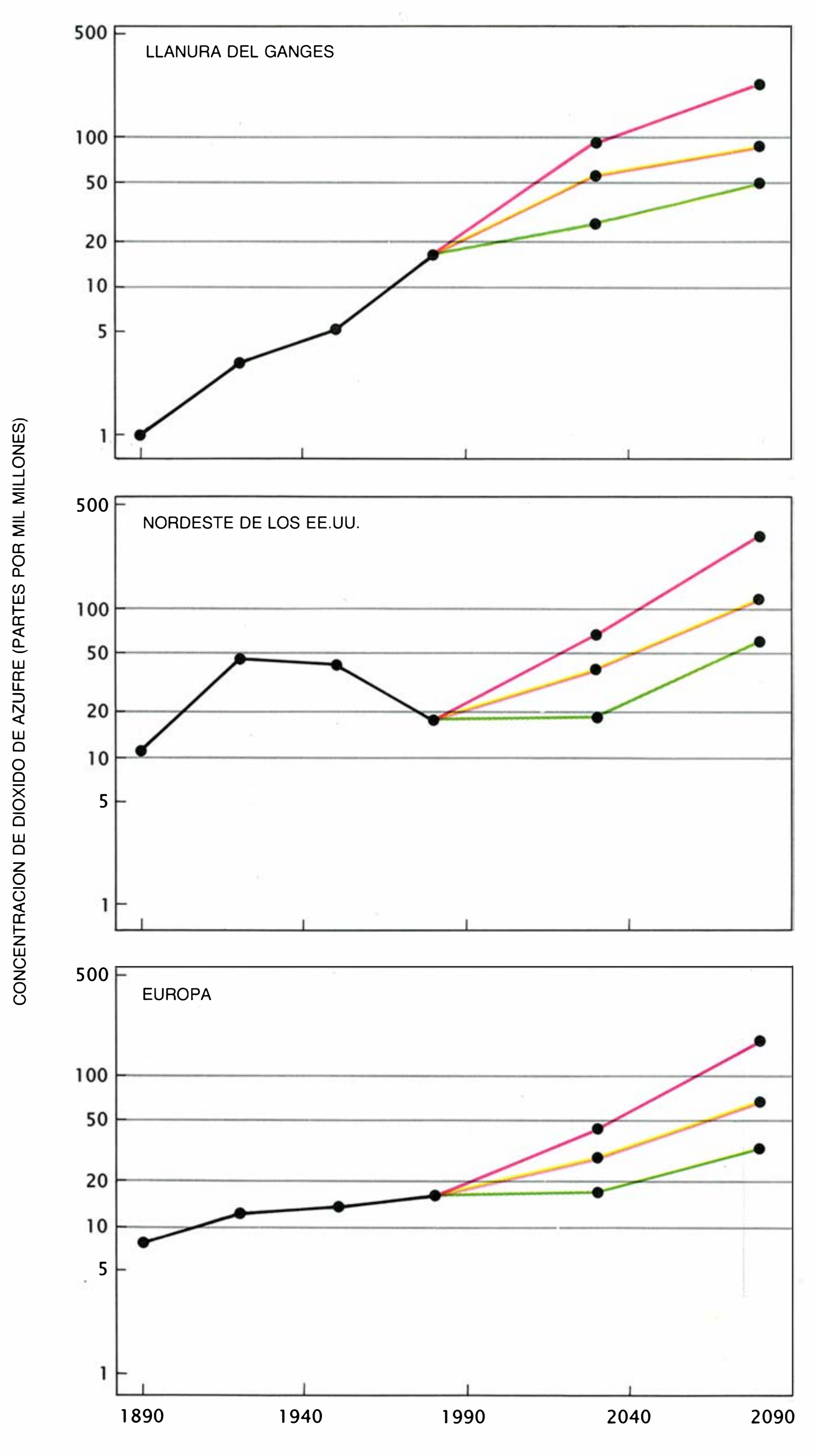
Se espera que aumenten las concentraciones de dióxido de azufre sobre las tres regiones, en parte porque escasearán probablemente los combustibles con bajo contenido de azufre (aunque unos controles de emisión severos podrían estabilizar los niveles sobre los EE.UU. y Europa durante algunas décadas). Los aumentos más pronunciados podrían darse en la India y otros países en vías de desarrollo, cuyas poblaciones crecen rápidamente y tienen acceso a abundante provisión de carbón con alto contenido de azufre, combustible relativamente barato. Resulta evidente que deben introducirse medidas drásticas en el sector energético para impedir que el dióxido de azufre alcance concentraciones muy altas en el siglo venidero.

Podría registrarse también mayor concentración de un gas que todavía no hemos considerado: el monóxido de carbono, que tiene el poder de reducir la capacidad de autolimpieza de la atmósfera. Es probable dicho aumento porque es de esperar que crezcan todas sus fuentes: combustión de carburantes fósiles y de biomasa y reacciones atmosféricas que incluyen metano. Por otra parte, en la atmósfera sobre los trópicos se forma una cantidad apreciable, aunque todavía no bien cuantificada, de monóxido de carbono en virtud de la rotura de hidrocarburos emitidos por la vegetación, fuente ésta que las actividades humanas están eliminando. Las concentraciones futuras de monóxido de carbono son, por tanto, inciertas; en conjunto, muchos investigadores prevén, sin embargo, un aumento del mismo sobre el hemisferio Norte.

El monóxido de carbono mina la capacidad de autolimpieza de la atmósfera porque rebaja la concentración del radical hidroxilo; es éste un importante "detergente" porque reacciona con casi cualquier molécula de gas traza de la atmósfera, incluidas las que, salvo con él, son inertes. Sin el hidroxilo, las concentraciones de la mayoría de los gases traza se harían mucho mayores de lo que lo son hoy, y la atmósfera en conjunto tendría unas



5. BRUMA FOTOQUIMICA sobre Sao Paulo. Se trata de un problema que preocupa a muchas zonas urbanas. Se forma cuando la radiación solar actúa sobre ciertas emisiones antropogénicas —especialmente óxidos de nitrógeno e hidrocarburos procedentes de tubos de escape de los vehículos—, produciendo una mezcla indeseable de gases cerca del suelo. El componente principal es el ozono (O_3), que daña ojos y pulmones y perjudica árboles y cosechas.



6. CONCENTRACIONES DE DIOXIDO DE AZUFRE sobre distintas regiones: una recién industrializada, la llanura india del Ganges, y dos de añeja industrialización (el nordeste de los Estados Unidos y Europa) (*en negro*); se han examinado y se han extrapolado hasta dentro de 100 años (*en colores*). Las extrapolaciones suponen que la población y el consumo de energía de cada una de las regiones crecerá y lo hará también la combustión de carbón (uno de los máximos productores de dióxido de azufre) como fuente de energía. Las extrapolaciones difieren según la exigencia de las medidas de control de emisiones: baja (*rojo*), moderada (*naranja*) o alta (*verde*). Los resultados indican que los niveles de dióxido de azufre probablemente aumentarán, aunque unas medidas de control severas podrían retrasar el aumento sobre los Estados Unidos y Europa. Como también se esperan aumentos para varios otros gases traza, los autores del artículo destacan la imperiosa necesidad de una cooperación global para reducir en lo posible las emisiones indeseables y, consiguientemente, las perturbaciones que producen en el medio ambiente.

propiedades químicas, físicas y climáticas totalmente diferentes.

Nuestras previsiones para el futuro son, pues, desalentadoras si la actividad humana continúa emitiendo grandes cantidades de gases traza a la atmósfera. El crecimiento demográfico y el desarrollo no sólo están cambiando la química de la atmósfera, sino que están también conduciendo velozmente el planeta hacia un calentamiento climático de magnitud sin precedentes. Este cambio climático, en combinación con el aumento de las concentraciones de varios gases, constituye un experimento de riesgo potencial del que toma parte cada habitante de la Tierra.

Preocupa sobremanera la posibilidad de sorpresas indeseadas si el hombre sigue presionando sobre una atmósfera cuyos mecanismos internos e interacciones con organismos y materiales se conocen de forma incompleta. El agujero de ozono antártico es un ejemplo particularmente ominoso de las sorpresas que pueden acecharnos. Su inesperada gravedad ha mostrado, fuera de toda duda, hasta qué punto la atmósfera es sumamente sensible ante lo que parecen pequeñas perturbaciones químicas; y ha revelado que las secuelas de esas agresiones pueden surgir mucho antes de lo que los más astutos científicos llegan a imaginar.

A pesar de todo, en nuestras manos está tomar algunas medidas para contrarrestar los rápidos cambios atmosféricos, medidas que, tal vez, aminoren las amenazas conocidas y desconocidas. Es evidente, por ejemplo, que una reducción importante de la tasa de consumo de combustibles fósiles frenaría el calentamiento de invernadero, disminuiría la bruma química, mejoraría la visibilidad y reduciría la deposición ácida. Otras medidas se referirían a determinados gases: el metano, cuya emisión se limitaría interviniendo en los vertederos evitando así su liberación y, quizá también, adoptando métodos menos derrochadores de producción de combustibles fósiles. Las mismas emisiones de metano por el ganado podrían rebajarse recurriendo a nuevos métodos de alimentación.

Y lo que resulta más alentador: las personas y las instituciones comienzan a cobrar conciencia de que sus acciones tienen consecuencias no sólo locales, sino globales, para la atmósfera y la habitabilidad del planeta. Algunos ejemplos recientes avalan ese estado de opinión. En el protocolo de Montreal de 1987, decenas de naciones acordaron

reducir a la mitad sus emisiones de halocarburos para fin de siglo; varios países y los principales fabricantes de halocarburos acaban de anunciar su intención de eliminar esos productos para dichas fechas. Algunas de las naciones que han firmado el protocolo de Montreal se plantean ya la posibilidad de una "ley internacional de la atmósfera". Se orientaría a limitar la liberación de gases traza con incidencia en el efecto de invernadero y en las reacciones químicas: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, dióxido de azufre y gases NO_x.

Igual que otros muchos, los autores opinan que la solución de los problemas ambientales de la Tierra reside en un esfuerzo global de colaboración sin precedentes entre los científicos, la ciudadanía y las autoridades. Las naciones de mayor avance técnico deben limitar su consumo sin tasa de los recursos de la Tierra. Ha de ayudarse a los países en vías de desarrollo en el diseño de sus estrategias y en la adopción de técnicas no lesivas para el entorno mientras elevan el nivel de vida de sus poblaciones, cuyo rápido crecimiento y mayores necesidades de energía son una importante causa de preocupación ambiental. Dedicando la debida atención a mantener intactas las características de la atmósfera, tal vez los cambios químicos que se están produciendo ahora puedan mantenerse dentro de límites que preserven los procesos físicos y el equilibrio ecológico del planeta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ATMOSPHERIC OZONE 1985: ASSESSMENT OF OUR UNDERSTANDING OF THE PROCESSES CONTROLLING ITS PRESENT DISTRIBUTION AND CHANGE. World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project, Report n.º 16, 1985.

NATIONAL AIR QUALITY AND EMISSION TRENDS REPORT, 1983. Environmental Protection Agency, Report EPA-450/4-84-029, 1985.

ACID DEPOSITION: LONG-TERM TRENDS. National Academy Press, 1986.

MODELING OF THE 1900-1980 TREND OF PRECIPITATION ACIDITY AT HUBBARD BROOK, NEW HAMPSHIRE. James A. Fay, Dan Golomb y Subramanyam Kumar en *Atmospheric Environment*, vol. 20, n.º 9, págs. 1825-1828; 1986.

THE ROLE OF ATMOSPHERIC CHEMISTRY IN ENVIRONMENT-DEVELOPMENT INTERACTIONS. P. J. Crutzen y T. E. Graedel en *Sustainable Development of the Biosphere*. Dirigido por William C. Clark y R. E. Munn. Cambridge University Press, 1986.

Un clima cambiante

Dentro de diez o veinte años el calentamiento del clima será un fenómeno patente. Saldremos de ese arriesgado experimento planetario si acometemos una inmediata reducción de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases

Stephen H. Schneider

En 1957, Roger Revelle y Hans E. Suess, de la Institución Scripps de Oceanografía, observaron que la humanidad estaba realizando "un gran experimentro geofísico". No lo acometía en ningún laboratorio, ni lo simulaba por ordenador; lo desarrollaba en nuestro propio planeta. Los resultados del experimento, que comenzó con la revolución industrial, se verán con toda claridad dentro de unos decenios. Desde aquellas fechas, los seres humanos han incrementado el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera en aproximadamente un 25 por ciento a través de la quema de carbón, petróleo y otros combustibles fósiles y de la tala de bosques; se desprende dióxido de carbono cuando arden o se pudren la leña y la hojarasca.

Aunque el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera no llega al 0,33 por ciento en volumen, sumado al vapor de agua y otros gases presentes en cantidades mucho menores en la atmósfera, así el metano y los clorofluorcarburos (CFC), desempeña un papel principal en la determinación del clima de la Tierra. Ya a principios del siglo XIX, se reconoció que el dióxido de carbono de la atmósfera producía un efecto de invernadero. El vidrio de un invernadero permite el paso libre de la luz solar, pero evita que escape el calor, al impedir, sobre todo, que el aire caliente del interior del invernadero se mezcle con el aire del exterior. De manera análoga, el dióxido de carbono y otros gases de invernadero muestran una relativa transparencia a la luz solar, pero aprisionan de forma eficaz el calor al absorber la radiación infrarroja de mayor longitud de onda emitida por la Tierra.

Hoy conocemos bien la capacidad de la atmósfera para retener el calor. Vista desde el espacio, la Tierra radia energía a longitudes de onda e intensidades características de un cuerpo a −18 grados Celsius. No obstante, la temperatura media en la superficie es unos 33 grados más alta: el calor queda aprisionado entre la superficie y el nivel medio, en la parte alta de la atmósfera, desde donde escapa la radiación. Entre los científicos dedicados a la atmósfera, no hay casi nadie que ponga en duda que el aumento de la concentración de dióxido de carbono y otros gases consolidará el aprisionamiento y hará el clima mas cálido.

¿Cuál es, pues, la cuestión que el experimento geofísico en curso se encargará de resolver? Aun cuando casi nadie discute el efecto de invernadero como proposición científica, su comportamiento sí es motivo de controversia. ¿Aumentarán las crecientes concentraciones de gases de invernadero la temperatura de la Tierra en uno, cinco u ocho grados Celsius? ¿Tardará el aumento 50, 100 o 150 años en notarse? ¿Se hará el clima más seco en Iowa o más lluvioso en la India? Las discrepancias se agrandan cuando se debate la política a adoptar. ¿Deben tomarse medidas para reducir el efecto de invernadero o para anticipar sus efectos? ¿Qué medidas y cuándo? Frente a tanta disputa, importa acotar bien qué dominamos, qué conocemos poco y qué ignoramos del todo acerca del efecto de invernadero.

Las pruebas circunstanciales del pasado geológico e histórico apoyan una relación entre el cambio climático y las fluctuaciones de los gases de invernadero. Se cree que, hace entre 3500 y 4000 millones de años, la luminosidad solar era alrededor de un 30 por ciento mas débil que ahora. Pese a ello, la vida se desarrolló y se formaron las rocas sedimentarias bajo aquel joven Sol: al menos, parte de la superficie terrestre estaba por encima del punto de congelación del agua. Para algunos investigadores, la primitiva atmósfera alojaría 1000 veces más dióxido de carbono que la actual, con lo que la débil radiación se compensaría con el aprisionamiento de calor por la atmósfera.

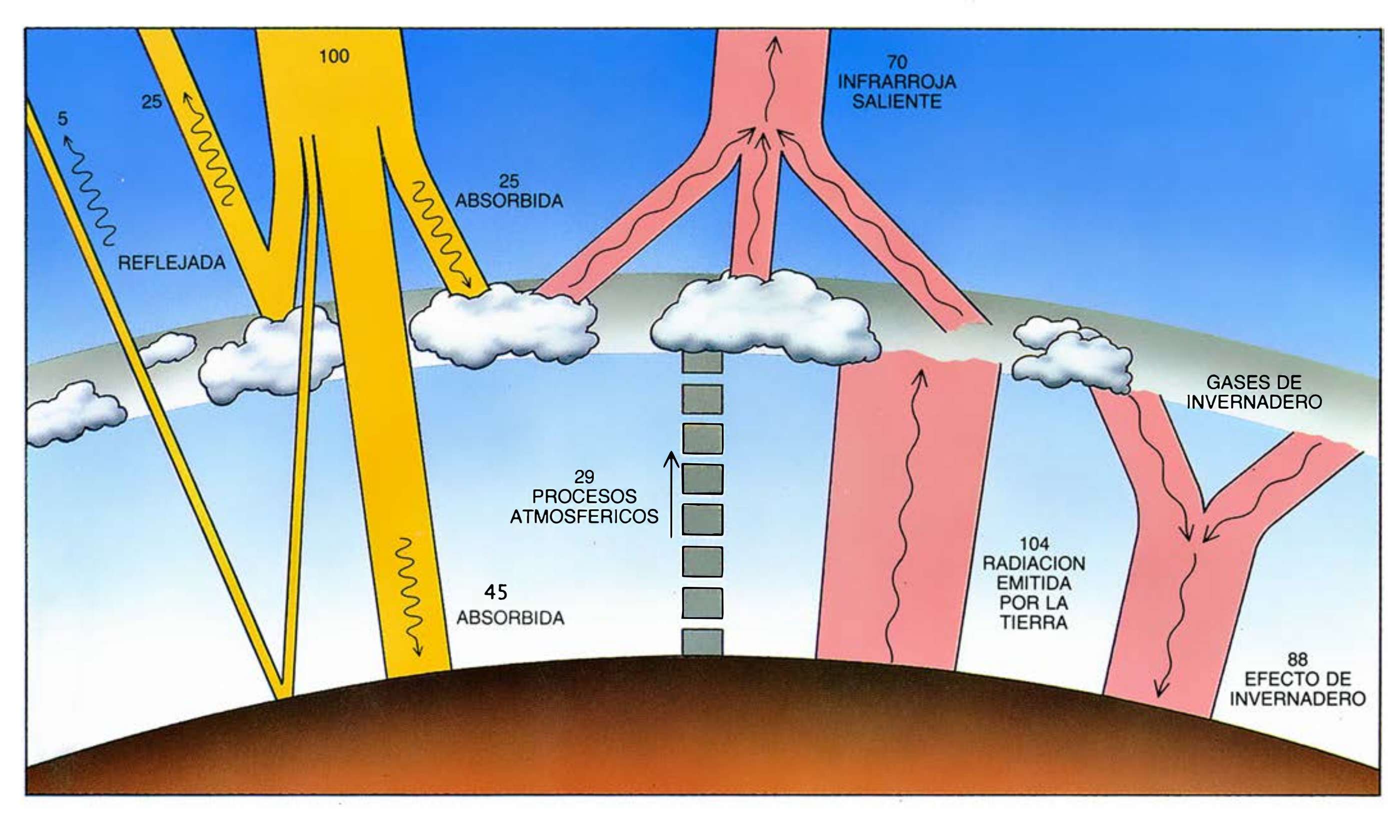
Más tarde, un efecto de invernadero intensificado pudo haber causado el calor excepcional que reinó durante la era Mesozoica −la edad de los dinosaurios−, cuyas huellas fósiles sugieren una Tierra con 10 o 15 grados Celsius por encima de la temperatura actual. En aquella época, hablamos de hace más de 100 millones de años, los continentes ocupaban posiciones diferentes de las de hoy, alteraban la circulación de los océanos y, quizás, incrementaban el transporte de calor desde los trópicos hasta las altas latitudes. Otros, sin embargo, entre ellos Eric J. Barron, hoy en la Universidad del estado de Pennsylvania, estiman que la geografía paleocontinental no puede explicar más que la mitad del calentamiento del Mesozoico.

El aumento de dióxido de carbono puede justificar fácilmente un calentamiento adicional, según propusieron Aleksandr B. Ronov, del Instituto Hidrológico del Estado, y Mikhail I. Budyko, del Observatorio Geofísico Principal (ambos en Leningrado), y calcularon Barron, Starley L. Thompson, del Centro Nacional de Investi-

STEPHEN H. SCHNEIDER es jefe del programa interdisciplinario de sistemas climáticos del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) de Boulder, Colorado. Schneider, doctorado por la Universidad de Columbia, ha publicado más de 100 trabajos científicos y ha actuado frecuentemente de portavoz de asuntos climáticos ante el Congreso, amén de ser consejero del gobierno federal. Los puntos de vista expresados en este artículo no son necesariamente los de la Fundación Nacional de la Ciencia de los Estados Unidos, patrocinadora del NCAR.

1. CAMPOS AGOSTADOS y convertidos en arenal durante la sequía que padeció Texas en 1983. Imagen que podría multiplicarse si, como varios modelos predicen, el calentamiento reduce la humedad en las partes centrales de los continentes, donde se concentra la producción de cereales.





2. APRISIONAMIENTO DEL CALOR por la atmósfera; ese fenómeno domina el balance energético de la Tierra. Alrededor del 30 % de la energía solar incidente es reflejada (*izquierda*) por las nubes y partículas en la atmósfera o por la superficie terrestre. El 70 % restante se absorbe. La energía absorbida se reemite en longitudes de onda infrarrojas por la atmósfera y la superficie. Como la mayor parte de la radiación emitida por ésta es aprisionada por las nubes y los gases de invernadero y devuelta a la Tierra, la superficie está 33° más caliente de lo que lo estaría sin ese aprisionamiento.

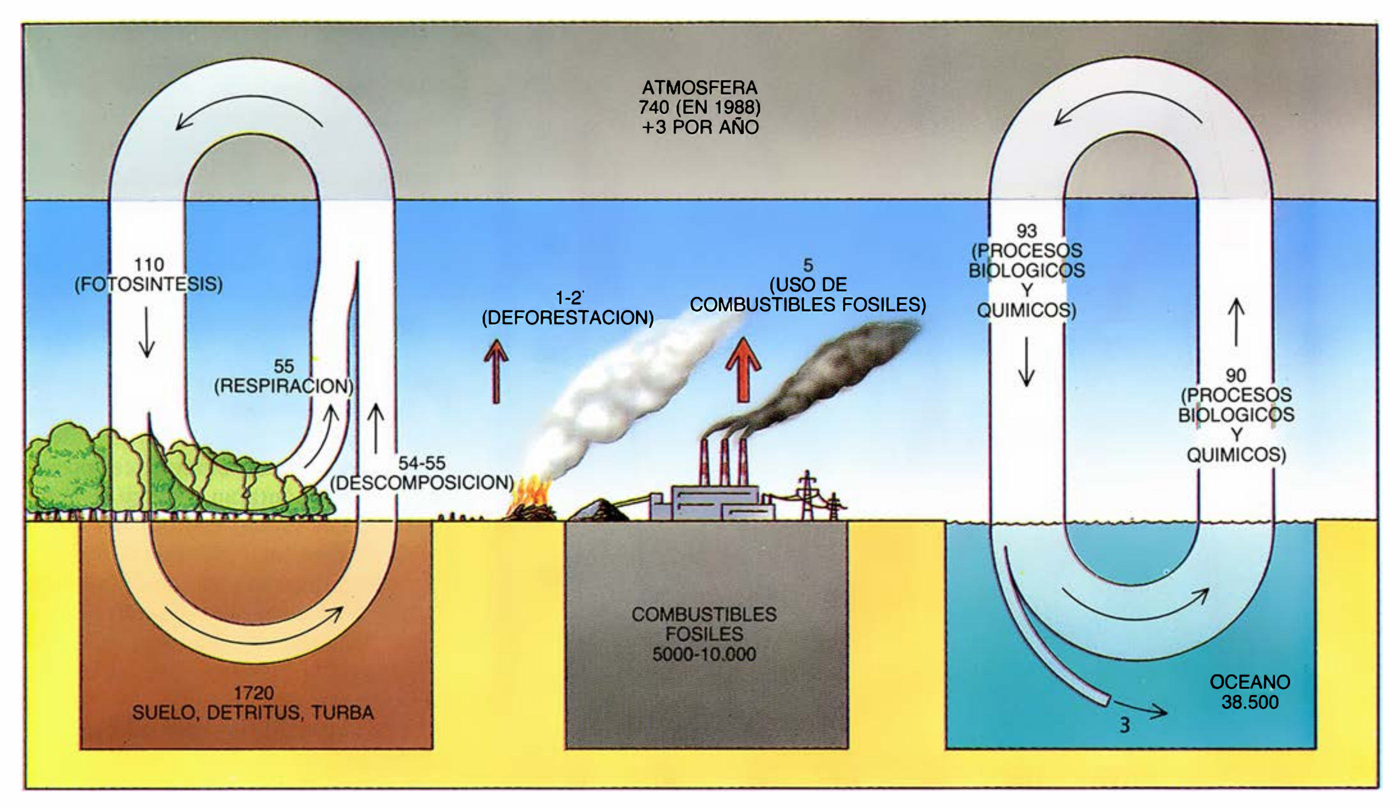
gación Atmosférica (NCAR), y el autor. Un modelo geoquímico construido por Robert A. Berner y Antonio C. Lasaga, de la Universidad de Yale, y Robert M. Garrels, que se desempeñó en la Universidad del Sur de Florida, aboga por la idea según la cual el dióxido de carbono pudo haberse desprendido a raíz de una actividad volcánica de insólita violencia que se produjo en las crestas centro-oceánicas, donde el magma que aflora crea nuevos fondos oceánicos [véase "Modelización del ciclo geoquímico del carbono", por Robert A. Berner y Antonio C. Lasaga; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1989].

Una prueba directa que relaciona los gases de invernadero con los espectaculares cambios climáticos de la edad de Hielo nos la ofrecen las burbujas de aire aprisionadas en los hielos antárticos; derivan de las antiguas nevadas que se acumularon para formar los bancos de hielo. Un grupo dirigido por Claude Lorius, del Laboratorio de Glaciología y Geofísica del CNRS en Grenoble, examinó más de 2000 metros de testigos de hielo —un archivo de 160.000 años— extraído en un proyecto de perforación ruso en la base Vostok, en la Antártida. Los análisis de laboratorio de los gases aprisionados en el testigo mostraron que los niveles de metano y dióxido de carbono de la atmósfera de entonces variaban al unísono; y lo que era más importante, lo hacían también con la temperatura local (determinada a partir de la relación entre isótopos del hidrógeno de las moléculas de agua del hielo).

Durante el período interglacial en que nos encontramos (los últimos 10.000 años) y el anterior, otro período de 10.000 años transcurrido 130.000 años atrás, la temperatura local alcanzó, en promedio, unos 10 grados Celsius por encima de la temperatura en el momento álgido de las edades del hielo. (La Tierra en su conjunto era unos 5 grados Celsius más cálida.) Al mismo tiempo, la atmósfera contenía alrededor de un 25 por ciento más de dióxido de carbono y un 100 por ciento más de metano que durante los períodos glaciales. No está claro si los gases de invernadero produjeron los cambios climáticos, o viceversa. Lo más probable es que los períodos glaciales vinieran inducidos por otros factores: cambios en los parámetros orbitales de la Tierra y dinámica interna de la acumulación y retracción del hielo; ahora bien, los cambios biológicos y las variaciones de la circulación oceánica condicionaron, a su vez, el contenido de gases traza en la atmósfera, ampliando las oscilaciones climáticas.

Más preciso es el archivo, de los gases de invernadero y el clima, correspondiente a los últimos 100 años; centuria que ha registrado no sólo un ulterior incremento de un 25 por ciento en el dióxido de carbono, sino también otra duplicación del contenido del metano atmosférico. Dos grupos, uno dirigido por James E. Hansen, del Instituto de Estudios Espaciales Goddard, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), y el otro por T. M. L. Wigley, de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de Anglia Oriental, han construido archivos de la temperatura media global en superficie durante el último siglo. Los investigadores se apoyaron en datos que, en muchos casos, provenían de las mismas estaciones de observación en torno al globo (la Unidad de Investigación Climática incluyó también lecturas tomadas en el mar), si bien emplearon técnicas distintas para analizar los registros y compensar sus limitaciones. Ciertas estaciones de observación cambiaron de emplazamiento en el curso del pasado siglo y las lecturas tomadas en el centro de las ciudades pudieron quedar sesgadas como consecuencia del calor desprendido por las máquinas o almacenado por edificios y pavimento.

Es probable que este efecto de "isla térmica urbana" haya adquirido proporciones desmesuradas en los Estados



3. INTERCAMBIO DE CARBONO entre la atmósfera y sus depósitos en la Tierra. Las cifras dan los flujos anuales aproximados de CO_2 y la cantidad, también aproximada, almacenada en cada depósito en miles de millones de toneladas métricas. Los ciclos existentes —uno sobre tierra firme y otro sobre los océanos— eliminan de la atmósfera casi tanto carbono como le aportan, pero la actividad humana —deforestación y combustión de carburantes fósiles— está en la actualidad aumentando la cantidad de carbono atmosférico en unos 3000 millones de toneladas métricas al año. (Datos de Bert Bolin.)

Unidos y otros países desarrollados; pero, aun cuando se aplicase al conjunto global de datos la misma corrección calculada para los datos de los EE.UU. (por Thomas R. Karl, del Centro Nacional de Datos Climáticos en Asheville, Carolina del Norte, y P. D. Jones, de Anglia Oriental), queda aproximadamente medio grado Celsius de calentamiento "real" por explicar en ambos archivos. En concordancia con esa tendencia, el decenio de 1980 parece ser el más cálido registrado hasta la fecha, y los años más cálidos los de 1988, 1987 y 1981, en ese orden.

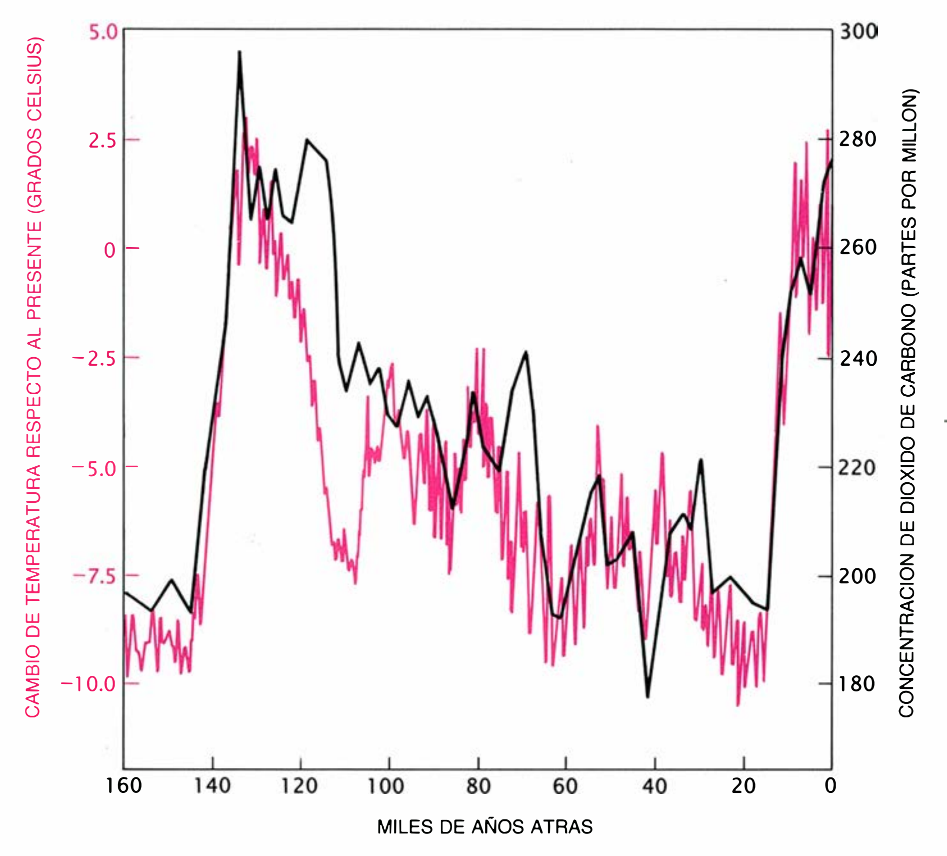
¿Es ésta la señal del calentamiento causado por el efecto de invernadero? Nos tienta aceptarlo, pero no hay prueba definitiva. Por un lado, en vez del calentamiento continuo que cabría esperarse de una acumulación continuada de gases de invernadero, el registro evidencia un rápido calentamiento hasta el final de la segunda guerra mundial, un ligero enfriamiento durante mediados del decenio de 1970 y otro período de rápido calentamiento desde entonces.

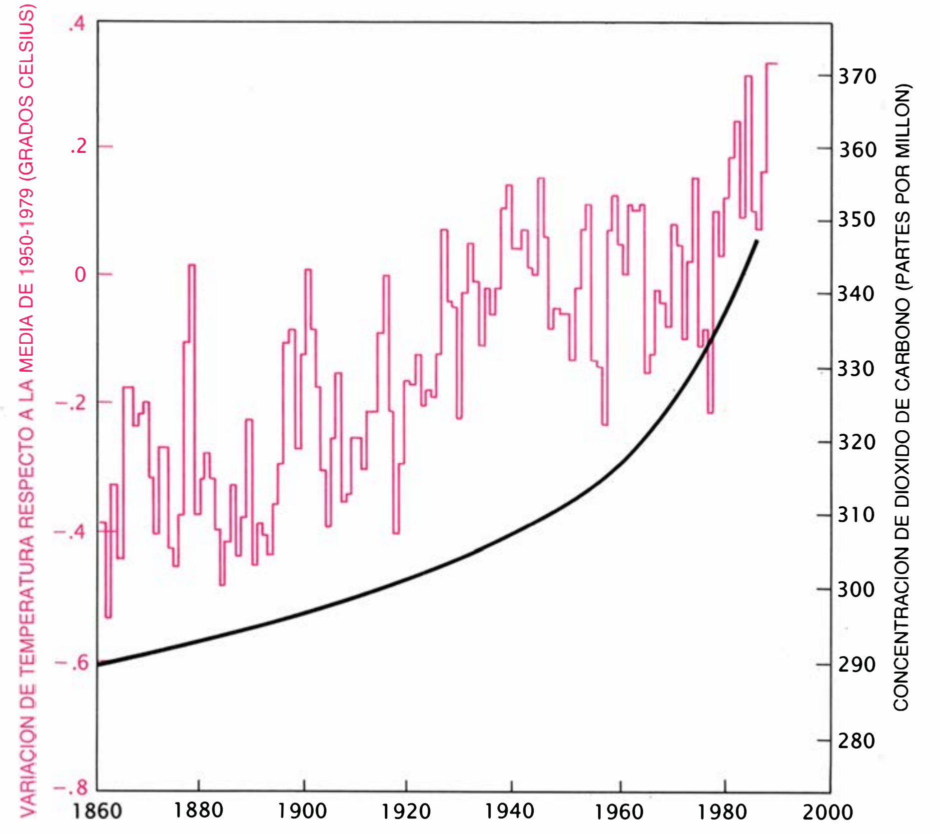
¿Qué trayectoria seguirá ahora la curva de temperatura? Tres son las cuestiones fundamentales que deben contestarse en toda predicción del futuro del clima. A saber, ¿cuánto dióxido de carbono y otros gases de invernadero se emitirá?, ¿en cuánto aumentarán los niveles atmosféricos de esos gases en virtud de las emisiones? y ¿qué efectos climáticos producirán las acumulaciones resultantes, después de tomar en consideración los factores humanos y naturales que podrían dilatar o mitigar esos efectos?

La previsión de las emisiones futuras exige un tortuoso ejercicio de ciencias sociales. La cantidad de dióxido de carbono que emita en el futuro la humanidad en su conjunto dependerá sobre todo del consumo global de combustible fósil y de la tasa de deforestación (presumible responsable de la mitad de la acumulación desde 1880 y del 20 por ciento de las emisiones actuales). Cada factor de ésos está condicionado, a su vez, por otros muchos. El mayor uso de combustibles fósiles, por ejemplo, reflejará el aumento de la población, el ritmo al que se adopten fuentes diferentes de energía, de las medidas de conservación y del estado de la economía mundial. Las previsiones típicas aceptan que el consumo de combustibles fósiles proseguirá sin cambios con la misma intensidad actual —es decir, mucho más lentamente de lo que crecía antes de las crisis energéticas de los años setenta— para registrar un aumento de las emisiones de dióxido de carbono de entre 0,5 y 2 por ciento anual durante al menos los próximos decenios.

Otros gases de invernadero, tales como el metano, los CFC, los óxidos de nitrógeno y el ozono de la baja troposfera, podrían aportar una contribución conjunta al efecto de invernadero de igual proporción que la del dióxido de carbono, aun cuando se emiten en cantidades mucho menores: absorben, con eficacia mucho mayor, la radiación infrarroja. Pero predecir las futuras emisiones de esos gases resulta todavía más complicado que para el dióxido de carbono. Las fuentes de algunos gases, la del metano es una, no se conocen bien; la producción de los CFC y del ozono de baja atmósfera, podría elevarse o caer bruscamente según se tomen o no medidas políticas y técnicas.

Ante un cuadro plausible de emisión futura de dióxido de carbono, ¿con qué rapidez aumentará entonces su concentración en la atmósfera? El dióxido de carbono atmosférico se halla sujeto a la absorción continua por parte de las plantas verdes y en procesos biológicos y químicos de los océanos. La velocidad de almacenamiento del dióxido de carbono cambiará probablemente al hacerlo la concentración atmosférica; esto es, habrá procesos de realimentación que entrarán en la ecuación. Por ser materia prima de la fotosíntesis, un aumento de la concentración atmosférica del dióxido de carbono podría acelerar su absorción por las plantas, con-





4. CORRELACION DEL DIOXIDO DE CARBONO Y LA TEMPERATURA, muy estrecha a lo largo de los últimos 160.000 años (*arriba*) y, menos, a lo largo de los últimos 100 años (*abajo*). El registro de larga duración, basado en datos obtenidos en la Antártida, muestra cómo la temperatura local (*en color*) y el dióxido de carbono atmosférico ascendieron casi al unísono al terminar un período glacial hace unos 130.000 años, cayeron casi en sincronía al comienzo de un nuevo período glacial y de nuevo ascendieron al retirarse los hielos hace unos 10.000 años. El registro de temperatura reciente muestra un ligero calentamiento global (*en color*) descubierto por los investigadores de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de Anglia Oriental, en el Reino Unido. Se debate si la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera que lo acompaña ha sido o no la causa última del calentamiento de medio grado.

trarrestando parte de la acumulación en la atmósfera. De manera análoga, como el contenido de dióxido de carbono en las aguas superficiales oceánicas se mantiene aproximadamente en equilibrio con el de la atmósfera, un aumento en la absorción por parte del océano podría frenar hasta cierto punto la acumulación. (Cuanto más lenta sea ésta, tanto más efectiva, proporcionalmente, sería la absorción oceánica.)

Pero cabe también que el aumento de la concentración del dióxido de carbono y otros gases de invernadero desencadene realimentaciones positivas que incrementaran la carga de la atmósfera. Un rápido cambio del clima podría desbaratar ecosistemas forestales y otros, minando su capacidad para extraer de la atmósfera dióxido de carbono. Además, el calentamiento climático podría provocar una descomunal liberación de la cantidad ingente de carbono contenido en los suelos en forma de materia orgánica muerta. Esta reserva de carbono —al menos doble de la almacenada en la atmósfera— sufre una incesante descomposición en dióxido de carbono y metano por la acción de los microorganismos del suelo. Un clima más cálido podría acelerar el trabajo de éstos y liberar más dióxido de carbono (de los suelos secos) y metano (de los arrozales, marismas y zonas pantanosas), que reforzarían, a su vez, el calentamiento. Hay también grandes cantidades de metano apresado en los sedimentos de las plataformas continentales y bajo el permafrost ártico en forma de clatratos, que son retículos moleculares de metano y agua. El calentamiento de las aguas someras de los océanos y la fusión del permafrost podría liberar parte del metano.

A pesar de tanto cabo por atar, muchos investigadores confían en que la absorción por las plantas y por los océanos modere la acumulación de dióxido de carbono, al menos durante los próximos 50 o 100 años. Las estimaciones típicas, que parten de las actuales tasas de emisión, o algo mayores, cifran la fracción de nuevo dióxido de carbono inyectado que quedará en la atmósfera en aproximadamente una mitad. Bajo tal supuesto, la concentración atmosférica alcanzará las 600 partes por millón, el doble del nivel de 1900, entre los años 2030 y 2080. Se espera, sin embargo, que otros gases de invernadero se acumulen antes que el dióxido de carbono.

¿Qué efecto producirá sobre el clima la duplicación del dióxido de carbono atmosférico? Cuantitativamente hablando, el registro histórico no nos saca

de dudas. Ni se nos permite la reproducción física del clima —resultado de complejas interacciones entre la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la vegetación y los hielos polares— en un experimento de laboratorio. Para explorar el futuro del clima terrestre, mis colegas y yo fiamos en modelos matemáticos.

Se han elaborado modelos en el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos de la Universidad de Princeton, el Instituto Goddard de Estudios Espaciales, el NCAR y en otros lugares. Modelos que consisten en expresiones y en ecuaciones; las primeras son de las componentes en interacción del sistema océano-atmósfera; las ecuaciones representan las leyes físicas que rigen el comportamiento de las componentes: ley de los gases ideales y leyes de conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento. Por ejemplo, conocidos los valores de la energía recibida del sol y la composición de la atmósfera, el modelo calcula el "clima": la temperatura y, en los modelos muy complejos, la presión, velocidad del viento, humedad del aire y del suelo, amén de otras variables.

Para mantener dentro de límites manejables el trabajo de cálculo, éste se realiza sobre puntos discretos en una versión simplificada del mundo real. En los modelos más complicados —modelos de circulación general (MCG), que se desarrollaron en un comienzo para predicción del tiempo a largo o medio plazo—, la atmósfera está representada en una malla tridimensional con una separación horizontal media de varios centenares de kilómetros y un espaciado vertical de varios kilómetros; el clima se calcula sólo en los nudos de la malla. Pese a esta simplificación, hacer correr un MCG durante un año simulado requiere varias horas de trabajo de los superordenadores más rápidos existentes.

Para estudiar los efectos de la acumulación de un gas traza, el experto se limita a especificar la cantidad de gases de invernadero y comparar los resultados del modelo con una simulación testigo del clima actual, basada en la presente composición de la atmósfera. Los resultados de los MCG más recientes concuerdan en líneas generales: la duplicación del dióxido de carbono, o un incremento equivalente de otros gases traza, elevaría la temperatura media de la superficie terrestre de 3,0 a 5,5 grados Celsius. Tal cambio no tendría precedente en la historia humana; sería comparable al calentamiento de cinco grados producido desde el punto álgido del último período glacial hace 18.000 años, con la particularidad de que se desarrollaría de 10 a 100 veces más deprisa.



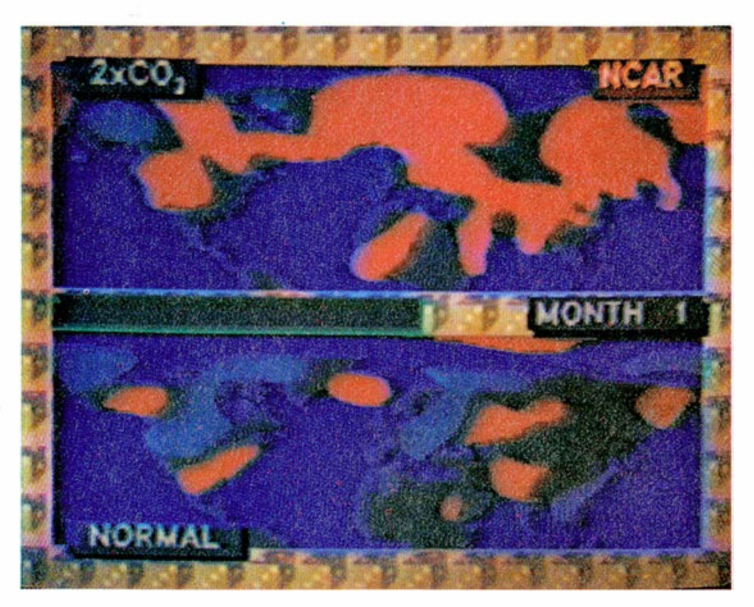
5. TESTIGO DE HIELO: segmento de un cilindro de dos kilómetros extraído por perforación de la capa de hielo en la base soviética Vostok, en la Antártida. Contiene encerradas burbujas de aire antiguo. El análisis de las burbujas y de la relación entre dos isótopos de hidrógeno en el hielo, que varía con la temperatura local, permitió a Claude Lorius y sus colegas del Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente de Grenoble reconstruir un archivo de gases traza y temperatura de 160.000 años.

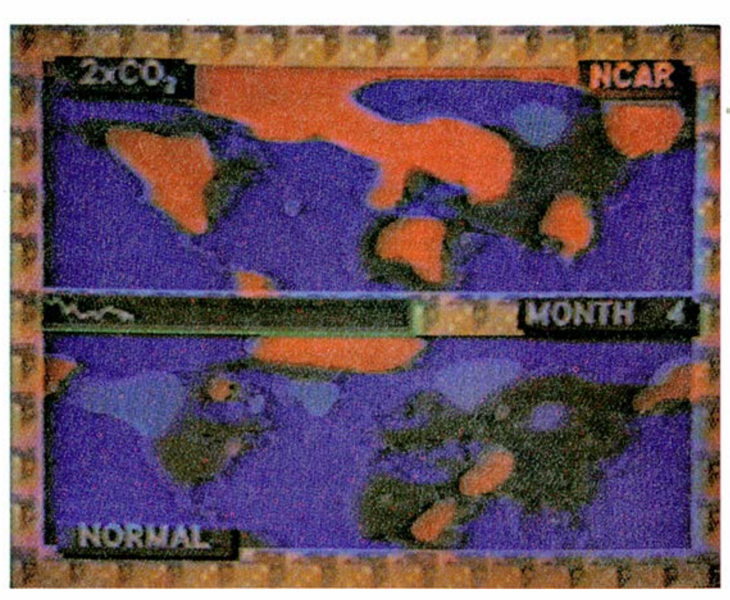
Los defectos de los modelos de ordenador limitan el grado de confianza de tales pronósticos. Muchos procesos que afectan al clima global, demasiado pequeños, no se aprecian en la tosca resolución de los modelos. La turbulencia atmosférica, la precipitación o la formación de nubes, cuya importancia climática es superfluo resaltar, no acontecen a escalas de cientos de kilómetros (la escala de la malla en un MCG), sino de contados kilómetros, o menos. Puesto que tales procesos se escapan a una simulación directa, los climatólogos deben hallar una manera de relacionarlos con las variables que sí admiten simulación en la grosera escala en que se mueve el modelo. Lo hacen introduciendo un parámetro —un coeficiente de proporcionalidad— que relaciona, por ejemplo, la nubosidad media dentro de una celda de la malla con la humedad relativa y la temperatura media (factores que el modelo puede calcular).

Esta estrategia de parametrización, así se llama, agrega fenómenos en pequeña escala que podrían actuar de focos de realimentación del cambio climático, bien amplificándolo o bien moderándolo. Las nubes, por ejemplo, reflejan la luz solar devolviéndola al espacio (lo que tiende a hacer el clima más frío) y absorben también radiación infrarroja de la Tierra (tendiendo a hacerlo más cálido). Que un efecto u otro predomine dependerá de la reflectividad de las nubes, de su altura, distribución y extensión. Recientes medidas tomadas por satélite han confirmado cálculos de veinte años de antigüedad y muestran que las nubes producen hoy un efecto de enfriamiento neto: la Tierra, considerada en su conjunto, sería mucho más cálida bajo cielos despejados. Pero el cambio climático podría causar pequeñas variaciones en las características de las nubes, alterando la naturaleza y cuantía de la realimentación. Los modelos diseñados, que sólo reproducen de forma grosera la nubosidad media, apenas pueden afirmar algo que ofrezca garantía acerca de la realimentación debida a las nubes, ni de otras muchas realimentaciones que dependen de procesos parametrizados.

Otro defecto de los actuales modelos reside en su tosco tratamiento de los océanos. Esas masas de agua ejercen poderosos efectos sobre el clima actual e influirán, sin duda, sobre los climas futuros. Su enorme capacidad calorífica actuará de "esponja térmica", frenando cualquier aumento inicial de la temperatura global mientras los propios océanos se calientan. La magnitud del efecto dependerá, a su vez, de la circulación oceánica, que en sí misma puede cambiar al paso que se calienta la Tierra. En principio, un modelo climático debería acoplar la atmósfera recreada con océanos cuya dinámica se simule con igual detalle. El problema calculatorio, sin embargo, es agobiante, y en la mayoría de los MCG aplicados al cálculo del calentamiento por efecto de invernadero se simplifica, se trata con resolución muy grosera o se ignora.

Además de limitar el grado de garantía de las predicciones globales, el tratamiento simplificador de los océanos impide también que los modelos den un cuadro definido sobre la variación del clima con el tiempo en regiones específicas. En una situación ideal, a uno le gustaría saber no sólo cuánto se calentará globalmente la Tierra, sino





6. INSTANTANEAS DE UN MUNDO DE INVERNADERO. Se han extraído de un modelo climático usado por el autor y Starley L. Thompson en el norteamericano Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). El modelo en cuestión siguió la evolución de las temperaturas en superficie, a lo largo de un año, en una atmósfera con doble nivel de dióxido de carbono que la actual (*arriba*); los resultados se compararon con los de otra simulación de

también si habrá mayor sequía en Almería, lloverá más sobre la India o aumentará la humedad de Buenos Aires. Sin embargo, mientras los océanos no estén en equilibrio con la atmósfera, sus efectos térmicos se sentirán de manera diferente en distintos lugares. La región donde haya poca mezcla entre las aguas superficiales y las aguas frías y profundas podría calentarse rápidamente; las regiones de altas latitudes, en las que las aguas profundas están mezcladas hasta la superficie, podría calentarse más lentamente. Estos efectos térmicos podrían, a su vez, afectar el régimen general de vientos, alterando con ello otras variables regionales, entre ellas la humedad y la precipitación. (Las predicciones regionales quedan comprometidas en muchos modelos por culpa, asimismo, de las representaciones simplificadas de la vegetación, que ignoran procesos de tanto interés climático como el desprendimiento de vapor de agua por las plantas y su efecto sobre el albedo de la superficie, o reflectividad.)

No obstante, los climatólogos tienen razones sólidas para recabar la confianza en las predicciones de la variación de la temperatura media global en superficie que nos ofrecen sus modelos. Los distintos elementos del modelo se pueden someter a prueba comparándolos con los resultados de un submodelo más detallado —simulación a escala menor y más fina— o con datos reales. Así, la parametrización de las nubes se cotejaría con mediciones reales de la relación de temperatura y humedad con nubosidad, en el marco de una superficie correspondiente a una celda del modelo.

La potencia de un modelo y, en particular, su capacidad para dar cuenta de procesos bastante rápidos (verbigracia, cambios en la circulación atmosférica o en la nubosidad media) se comprueba investigando su idoneidad para reproducir el ciclo estacional: variación semestral del clima hemisférico que es mayor que cualquier calentamiento de invernadero supuesto. Pese a la parametrización, la mayoría de los MCG reproducen muy bien el ciclo estacional de la temperatura en superficie; no se ha estudiado tan a fondo su capacidad para simular las variaciones estacionales de otras variables climáticas, piénsese en la precipitación o la humedad relativa.

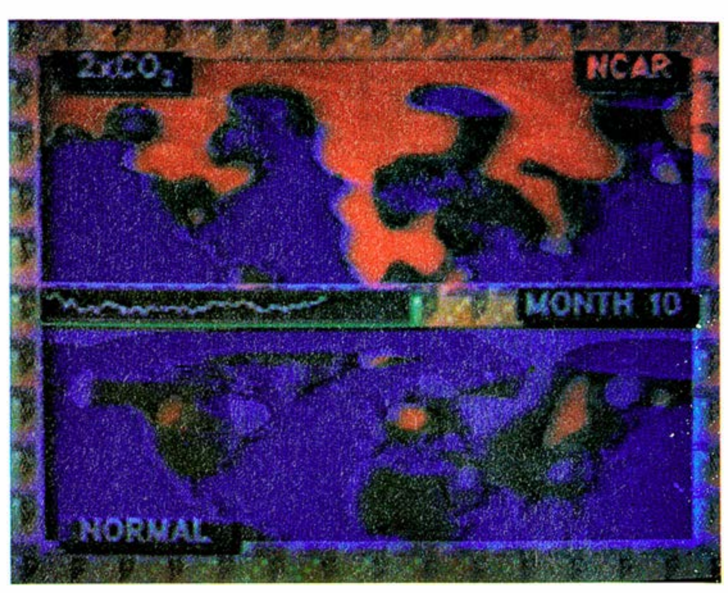
En un intervalo de decenios (escala temporal que importa en un calentamiento global inequívoco), entran en juego otros procesos más lentos que no afectan al ciclo estacional; nos referimos, por ejemplo, a las variaciones en las corrientes oceánicas o en la extensión de los glaciares. Las simulaciones de climas pasados —los períodos glaciales o el agobiante mesozoico— sirven de prueba para comprobar la exactitud a largo plazo de los modelos climáticos. A tales pruebas de validez global se pueden añadir simulaciones de los climas de otros planetas; en Venus, una densa atmósfera-invernadero mantiene una temperatura en superficie de unos 450 grados Celsius.

El registro de los últimos 100 años proporciona la única comprobación directa de la capacidad de los modelos para simular los efectos del calentamiento de invernadero que se está produciendo. Cuando un modelo climático se hace operar con una atmósfera con la composición de hace 100 años y luego con el histórico 25 por ciento de aumento del dióxido de carbono y la duplicación del metano, ¿predice el calentamiento de medio grado observado? La verdad es que la mayoría de los modelos predicen un calentamiento algo mayor, un grado cuando menos.

Si el aumento de temperatura observado es un calentamiento de invernadero y no mero "ruido" —una fluctuación aleatoria— habría varias maneras de explicar la discrepancia. Tal vez los modelos poseen una sensibilidad doble de la que deberían para pequeños aumentos de gases de invernadero, o, quizá, la red termométrica, incompleta y heterogénea, ha subestimado el calentamiento global. Cabe pensar que algún otro factor, no tenido en cuenta en los modelos, esté retrasando o compensando el calentamiento. O quién sabe si la capacidad calorífica de los océanos es mayor que la que los actuales modelos calculan, si la energía emitida por el Sol ha descendido ligeramente o si los volcanes han inyectado en la estratosfera más cenizas de las conocidas, reduciendo así la energía solar que llega al suelo.

Quizá valga la pena resaltar que el enfriamiento transitorio que interrumpió la tendencia al calentamiento comenzó alrededor de 1940 y presentó su máxima intensidad en el hermisferio Norte, coincidiendo en tiempo y lugar con un brusco aumento de las emisiones de azufre por parte de las fábricas y centrales térmicas que funcionaban





un año en la atmósfera presente (*abajo*). Las regiones en rojo estaban a más de seis grados Celsius por encima de la normal calculada con el modelo para la misma época del año en las condiciones presentes; las zonas en azul claro estaban más de seis grados por debajo. Las anomalías meteorológicas cambiaban de tamaño, forma y posición, pero el calentamiento predominaba siempre en la simulación de un mundo sometido al efecto de invernadero.

con carbón y petróleo. El azufre, una de las causas principales de lluvia ácida, se emite en forma de gas dióxido de azufre, pero, una vez en la atmósfera, se transforma en finas partículas de sulfato. Las partículas llegan muy lejos y sirven de núcleos de condensación para la formación de gotículas de nube; con ello, las nubes adquieren mayor densidad y brillo, reforzando su efecto de enfriamiento. Además, si no hay hollín unido al sulfato, éste forma una bruma reflectora incluso con cielo sin nubes. Las emisiones de azufre podrían constituir uno de los factores que ha frenado algo el efecto de invernadero en el hemisferio Norte, sobre todo desde la segunda guerra mundial.

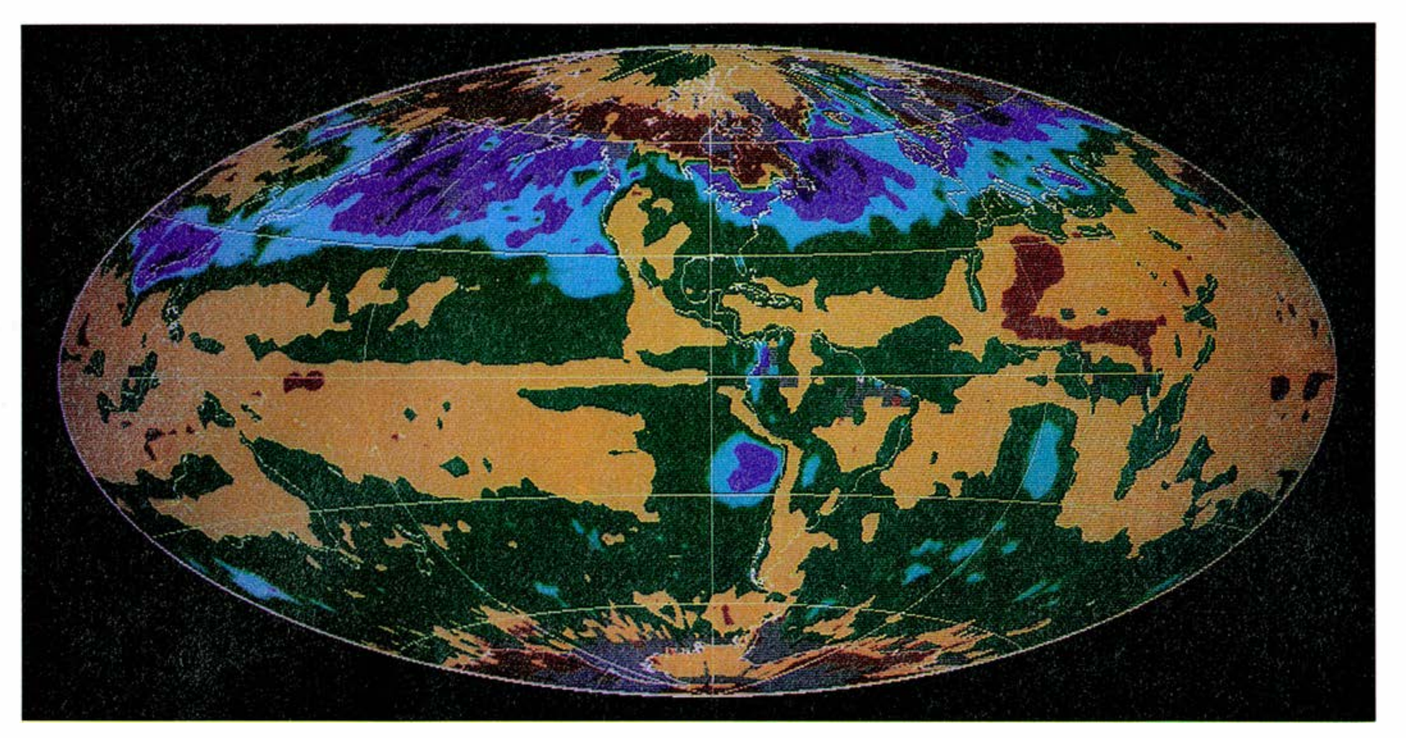
La discrepancia entre el calentamiento predicho y lo que se ha observado vuelve cautos a la mayoría de los climatólogos, que se guardan de asegurar (por ejemplo, con un 99 por ciento de confianza) que el efecto de invernadero está ya aquí. Pero se trata de una discrepancia tan pequeña, se hallan tan comprobados los modelos y es tan sólida la prueba de los efectos de los gases de invernadero sobre el clima, que la mayoría creemos que los aumentos de temperatura media superficial predichos por los modelos para los próximos 50 años son probablemente válidos con una incertidumbre entre la mitad y el doble. (Al decir "probablemente" se quiere indicar que su probabilidad es superior al 50 por ciento.) De aquí a unos diez años, se habrá de apreciar un calentamiento de la magnitud predicha, incluso en el ruidoso registro global de temperatura. Ahora bien, esperar a tal prueba concluyente y directa no es algo exento de riesgo: para entonces, el mundo puede estar ya implicado en un cambio climático mayor de lo que sería si se tomaran medidas desde ahora encaminadas a frenar la acumulación de gases de invernadero. Por supuesto, la obligación de actuar o no pertenece al ámbito de los juicios de valores, pero no al terreno de los problemas científicos.

¿Por qué preocuparse por cambios climáticos de la escala predicha por los modelos? Las variaciones de la temperatura y la precipitación podrían amenazar los ecosistemas naturales, la producción agrícola y las características de la habitación humana. Ciertas clases de bosques, por ejemplo, se dan en zonas geográficas definidas en gran parte por la temperatura. El cinturón de picea y abeto que ahora ocupa el Canadá medraba mucho más hacia el sur a finales del último período glacial, hace 10.000 años, siguiendo el borde de la capa de hielos. A medida que el clima se fue calentando en uno o dos grados cada 1000 años y los hielos retirándose, el cinturón de bosques emigró hacia el norte, a razón tal vez de un kilómetro por año. Los bosques no resistirían una migración más acelerada urgida por el calentamiento previsto. Muchos ecosistemas no pueden emigrar en absoluto: sólo existen en zonas protegidas, que podrían quedar aisladas en una región climática que, de repente, se tornara inhóspita.

La actividad humana se resentiría directamente si el calentamiento acelerase la evaporación, con merma de la escorrentía. En la parte occidental de los EE.UU., un aumento de temperatura en varios grados Celsius reduciría sustancialmente la escorrentía en la cuenca del Colorado, aun cuando la precipitación se mantuviese constante. A medida que el agua fuese escaseando, una mayor evaporación incrementaría la demanda de irrigación, forzando todavía más la ya precaria situación de agua disponible. Al propio tiempo, se degradaría la calidad de ésta, pues el mismo volumen de aguas residuales se diluiría en un menor caudal de corrientes fluviales.

Peor aún. Varios modelos climáticos predicen que la precipitación estival disminuiría en las zonas interiores de los continentes, sin excluir las llanuras centrales de los EE.UU. Dean F. Peterson, Jr., que enseñó en la Universidad del estado de Utah, y Andrew A. Keller, de la compañía Keller-Bliesner Engineering, estimaron los efectos, sobre la productividad de las cosechas, de un calentamiento de tres grados combinado con una pérdida de un 10 por ciento en la precipitación. Hallaron que, basándose en el aumento de los requerimientos hídricos para las cosechas y la disminución del agua disponible, la extensión viable de cultivo en las regiones áridas de los estados del oeste y las Grandes Llanuras descendería en casi un tercio. (La sequía del oeste podría también traducirse en una mayor frecuencia de incendios rurales.)

Por su lado, las zonas costeras habrían quizá de hacer frente a la elevación del nivel del mar. La mayoría de los investigadores esperan que un aumento global de temperatura de algunos grados Celsius a lo largo de los pró-



7. LAS NUBES CONDICIONAN LAS TEMPERATURAS EN SUPERFICIE porque reflejan al mismo tiempo la luz solar, impidiendo que se caliente la Tierra, y absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie, contribuyendo al efecto de invernadero. En esta imagen, basada en datos de satélite recogidos en abril de 1985, las nubes producían un efecto neto de enfriamiento en algunas regiones (*azules y verde*) y un efecto de calentamiento en otras (*rojo*). En conjunto, las nubes enfrían el planeta más de lo que lo calientan, pero las características de las nubes y su efecto sobre el clima podrían cambiar imprevisiblemente en un mundo de invernadero. La imagen fue proporcionada por V. Ramanathan, de la Universidad de Chicago.

ximos 50 a 100 años suba el nivel del mar entre 0,2 y 1,5 metros como consecuencia de la dilatación térmica de los océanos, la fusión de los glaciares en las montañas y la posible retracción del borde meridional del casquete de hielo de Groenlandia. (Los hielos aumentarían en la Antártida porque los inviernos, menos fríos, promoverían la aparición de nevadas.) El mayor nivel del mar, amén de poner en peligro ciertas poblaciones y ecosistemas costeros, podría salar las reservas de aguas freáticas. Pese a los muchos factores locales que se oponen a cualquier esfuerzo de aislar un indicio global inequívoco, un grupo de investigadores afirmó recientemente haber hallado un aumento mundial del nivel del mar de unos dos milímetros por año en series de mareogramas de muchos años. El aumento, sin embargo, es algo mayor de lo que cabría esperar a tenor del calentamiento experimentado hasta ahora.

A nadie se le escapa que esos efectos directos del cambio climático acarrearían importantes consecuencias económicas, sociales y políticas. Una caída de la producción agrícola del Medio Oeste y las Grandes Llanuras, por ejemplo, resultaría desastrosa para los agricultores y la economía de los EE.UU. Al disminuir también los excedentes de grano de los EE.UU., sus consecuencias, muy serias, afectarían hasta la misma seguridad internacional.

No todo el mundo saldría perdiendo. Si el cinturón cereal se limitara a correrse hacia el norte unos cientos de kilómetros, por ejemplo, las pérdidas de miles de millones de dólares en el estado de Iowa se convertirían en ganancias de miles de millones de dólares para los agricultores de Minnesota. Pero, ¿cómo compensar a los perdedores y hacer pagar a los ganadores? El problema de la equidad se tornaría más espinoso si atravesase las fronteras: si el desprendimiento de gases de invernadero provocado por la actividad económica de un país o grupo de países dañase a otras naciones con menos responsabilidad en la acumulación de tales gases.

Frente a esa gavilla de amenazas, podrían considerarse tres clases de respuestas. En primer lugar, algunos investigadores han propuesto medidas técnicas para contrarrestar el cambio climático. Se ha hablado, por ejemplo, de dispersar polvo en la alta atmósfera para reflejar la luz solar. Pero si no se pueden predecir con certeza los cambios climáticos naturales, los efectos de tales contramedidas resultarían más imprevisibles. Tales "reparaciones técnicas" correrían un riesgo real de salir mal o de que se les echara la culpa de fluctuaciones climáticas desfavorables que acontecieran al mismo tiempo.

Muchos economistas tienden a primar una segunda clase de acciones: la adaptación; a menudo la entienden con poco o ningún propósito de anticiparse a los daños o impedir los cambios climáticos. Los estrategas de la adaptación arguyen que las graves limitaciones de las previsiones climáticas hacen imprudente gastar grandes cantidades para impedir resultados que quizá no se produzcan nunca. Por contra, dicen, la adaptación es barata: las infraestructuras que hubieran de modificarse para hacer frente al cambio climático —sistemas de distribución de agua y obras costeras— tendrán que sustituirse en cualquier caso antes de que ocurran los grandes cambios climáticos. Las infraestructuras se irán reconstruyendo conforme lo exijan los cambios operados en el entorno.

La adaptación pasiva se decanta por ir reaccionando al paso de los acontecimientos. Podrían establecerse, sin embargo, algunas medidas de adaptación activa para facilitar la acomodación futura. Una comisión sobre cambio climático de la Asociación Americana para el Progreso de las Ciencias hizo una llamada exigente, quizá discutible, aunque convincente en la opinión del autor, en pro de la adaptación activa: los gobiernos, en todas sus instancias, deberían reexaminar las características técnicas de los sistemas de traída y distribución de aguas y los aspectos económicos y legales de dicho

servicio al objeto de incrementar la flexibilidad y el rendimiento de los sistemas implicados.

Al ir haciéndose el clima más cálido y variar la precipitación y la escorrentía, la escasez de agua se convertirá en fenómeno frecuente y se complicará la necesidad de transvases regionales. Aun cuando el clima no cambiase, una mayor flexibilidad de los sistemas de traída y distribución de aguas facilitaría abordar mejor el problema de las oscilaciones extremas del tiempo normal.

La tercera categoría de respuesta, la más activa también, reside en la prevención: evitar la acumulación de gases de invernadero. Las medidas para la conservación de la energía, el recurso a otras fuentes y el paso del carbón al gas natural u otros combustibles con menor contenido de carbono podrían todas reducir las emisiones de dióxido de carbono, como también lo haría el cese de la deforestación. Si se detiene la producción de los CFC, de dudosa fama por su capacidad para erosionar la capa estratosférica de ozono, se eliminaría otro componente de la acumulación. Margaret Mead y William W. Kellogg, del NCAR, presentaron en 1976 una propuesta de gran alcance para reducir las emisiones: una "ley del aire", que mantendría las emisiones de dióxido de carbono por debajo de ciertos límites globales asignando cupos de contaminación a cada país.

Las propuestas de acción inmediata generan polémica porque suelen exigir cuantiosas inversiones inmediatas como póliza de seguros contra futuros sucesos cuyo perfil estamos muy lejos de conocer bien. Pero, ¿hay algún principio que nos ayude a apostar por estas o aquellas medidas de prevención y adaptación? En mi opinión, la sensatez induce a emprender acciones que lleven consigo beneficios, aun cuando no se materialice la predicción de cambio climático.

La búsqueda de altos rendimientos energéticos nos ofrece un ejemplo válido de esta clase de estrategia. Un mejor uso de los combustibles fósiles frenará la acumulación de dióxido de carbono; más aún: aunque se hubiese exagerado la fragilidad del clima ante el dióxido de carbono, ¿qué se perdería con esta medida? Los altos rendimientos adquieren su sentido, por lo común en el marco económico; pues bien, la reducción del uso de combustibles fósiles limitaría la lluvia ácida y la contaminación urbana, disminuyendo también la dependencia de muchos países con respecto a los productores extranjeros. El desarrollo de otras fuentes de energía, la revisión de la ley del agua, la búsqueda de semillas mejoradas y resistentes a la sequía, la negociación de acuerdos internacionales de comercio sobre alimentos y otros bienes sensibles al clima: todos ellos son pasos que ofrecerían generosos beneficios, aun cuando el clima permaneciera como está.

Con frecuencia, sin embargo, tales medidas habrán de resultar costosas y políticamente controvertidas. Las normativas o los incentivos para fomentar técnicas que aprovechen mejor la energía pueden representar una carga mayor para determinados grupos —mineros del carbón y gente pobre, por ejemplo— que para otros; los costes podrían ser, asimismo, más elevados, en proporción, para los países pobres que para los ricos. Las acciones que impidan el calentamiento de invernadero deben ir acompañadas de medidas de política interior y exterior para tratar de equilibrar la equidad con la eficacia. Pese a ello, el autor considera mejor luchar contra la pobreza y fomentar el desarrollo mediante inversiones directas que manteniendo artificialmente bajos los precios de la energía e ignorando el gravamen de la destrucción del ambiente.

Hay quienes defienden que debiera ser el mercado libre, y no las normas gubernamentales o los incentivos fiscales, quien dictase las mejoras en el uso eficaz de la energía o la eliminación de los CFC, por ejemplo. Pero no se puede sostener de modo coherente que el mercado es "libre" cuando no incluye algunos de los costos potenciales de los daños contra el ambiente producidos por bienes o servicios. También los políticamente conservadores están de acuerdo en que el cálculo económico debe ceder el paso a la conciencia estratégica, cuando la seguridad nacional o global está en juego.

Y la seguridad está aquí en juego. Lo ponen de manifiesto las implicaciones que se derivan de un aumento de temperatura global, cifrado en varios grados o más, a lo largo del siglo venidero. Añádanse a las amenazas previstas y a las sorpresas que pueden estar al acecho en el siglo del invernadero: una brusca realimentación positiva en la acumulación de gases de invernadero en virtud de la descomposición acelerada de materia orgánica del suelo, espectaculares cambios en los climas regionales causados por alteraciones en la circulación oceánica y aparición de nuevas enfermedades o plagas del campo al romperse los ecosistemas. En el sistema de valores del autor —y esto es un juicio político— hace tiempo que deberían haberse promulgado medidas eficaces y vinculantes.

Me pregunto a menudo si mi pesimismo obedece a la imposibilidad de evitar ningún cambio global: de momento, no parece que haya políticas plausibles capaces de impedir que el globo se caliente en uno o dos grados. Dentro de todo, veo un aspecto positivo: la posibilidad de que un ligero, aunque manifiesto, calentamiento global, junto con la amenaza, más grave, predicha en los modelos de ordenador, catalice la cooperación internacional para alcanzar un desarrollo compatible con el ambiente, marcado por una población estabilizada y la proliferación de técnicas que aprovechen de forma eficaz la energía sin dañar el entorno. Se evitaría así un calentamiento de invernadero mucho mayor (y las consiguientes agresiones, más graves, contra el ambiente).

El mundo desarrollado podría tener que invertir cientos de miles de millones de dólares por año durante muchos decenios, en el propio país y en asistencia técnica y financiera a los menos avanzados, para lograr un mundo estabilizado y viable. Es fácil caer en el pesimismo ante las perspectivas de una iniciativa internacional de esas proporciones; pero no hace tanto que el cese de la tirantez y recelo entre la OTAN y las fuerzas del Pacto de Varsovia parecía también inconcebible. Hoy nos parece incluso verosímil. Tal vez los recursos que liberaría un tal acuerdo y el modelo de cooperación internacional que establecería abrieran el camino a un mundo en el que el siglo del invernadero existiera sólo en los microprocesadores de un superordenador.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GREENHOUSE EFFECT, CLIMATIC CHANGE, AND ECOSYSTEMS. Dirigido por Bert Bolin, B. R. Döös, Jill Jäger y Richard A. Warrick. John Wiley & Sons, 1986.

AN INTRODUCTION TO THREE-DIMENSIONAL CLIMATE MODELING. Warren M. Washington y Claire L. Parkinson. University Science, 1986.

CLOUD-RADIATIVE FORCING AND CLIMATE: RESULTS FORM THE EARTH RADIATION BUDGET EXPERIMENT. V. Ramanathan et al. en *Science*, vol. 243, n.º 4887, págs. 57-63; 6 de enero de 1989.

GLOBAL WARMING: ARE WE ENTERING THE GREENHOUSE CENTURY? Stephen H. Schneider. Sierra Club Books, 1989.

POSSIBLE CLIMATE CHANGE DUE TO SO_2-DERIVED CLOUD CONDENSATION NUCLEI. T. M. L. Wigley en *Nature*, vol. 339, n.º 6223, págs. 365-367; 1 de junio de 1989.

Ciencia y sociedad

Energía nuclear en un mundo viable

La actividad del hombre va ligada a la utilización y transformación de los recursos naturales para satisfacer sus necesidades. La energía es uno de estos recursos. Su uso es consustancial con la humanidad. La conquista del fuego, regalo de los dioses, es el hito definitivo de la evolución.

El desarrollo supone cubrir un número más amplio de necesidades, lo que exige una mejor y mayor utilización de recursos, entre ellos la energía. El reto de la tecnología es permitirlo, tanto a través de su mejor aprovechamiento, como de su obtención económica y con la mínima agresión contra el ambiente.

Haciendo frente a este reto la humanidad ha utilizado las distintas fuentes energéticas. Desde su origen ha aprovechado las energías renovables: solar, biomasa –como energía térmica y como energía animal–, eólica e hidráulica. La revolución industrial vino de la mano de la utilización de las energías fósiles. Y la última fuente energética que el hombre ha incorporado a sus recursos ha sido la energía nuclear.

El inicio de su utilización es históricamente reciente, si bien con una óptica tecnológica e industrial es anterior a la de muchos de los procesos y productos con los cuales estamos en contacto constante. En 1951 se produjo por vez primera electricidad de origen nuclear mediante un turbogenerador acoplado a un reactor de investigación de la Universidad de Chicago y, en 1956, entraba en operación, en la Unión Soviética, la primera central nuclear concebida para el suministro de energía a la red eléctrica Obninsk.

En la actualidad es una tecnología asentada. Las 429 centrales existentes en 26 países totalizan una experiencia superior a los 5000 años-reactor. En 1988 estas centrales produjeron 1,8 billones de kilowatt-hora. Ello representa que el 17 por ciento de la energía eléctrica generada en el mundo es de origen nuclear, si bien en países como Francia o Bélgica esta participación es cercana al 70 por ciento.

Como en todas las fuentes energéticas, esta contribución de la energía nuclear está y continuará estando determinada por las ventajas comparativas que pueda ofrecer. Por ello la tecnología nuclear tiene ante el futuro retos de mejora a los que hacer frente.

Reducir los costes de producción

Las empresas eléctricas consideraron la construcción de centrales nucleares en función de su rentabilidad económica, ya que sólo constituían una alternativa más para la producción de electricidad. Su evaluación constituyó objeto de estudio desde el momento en que se planificaron las primeras centrales comerciales. El análisis económico de la central de Oyster Creeck realizado en 1964 puede considerarse arquetípico. Desde entonces, ha continuado la realización de estudios en los que sucesivamente se han introducido datos corroborados por la realidad, aumentando la fiabilidad de las comparaciones.

Desde 1983 la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) reúne en un informe común y homogéneo los análisis de costes de producción de electricidad mediante centrales nucleares y de carbón en los países de este área. En él se refleja una ventaja comparativa de la energía nuclear.

El informe de 1986, fundado sobre proyecciones de coste de centrales que vayan a estar terminadas en 1995, concluye que para los países europeos y Japón la energía procedente del carbón será entre un 20 por ciento (caso de España) y un 80 por ciento (caso de Francia) más cara que la electricidad nuclear. En los Estados Unidos la competitividad relativa depende de las regiones, existiendo variaciones considerables en los precios del carbón y en los costes de construcción de las centrales nucleares. La electricidad nuclear puede ser entre un 20 por ciento más cara y un 20 por ciento más barata que la producida con carbón.

La incidencia de los costes de inversión en el coste total de generación de energía nuclear es superior al 60 por ciento. Por ello la reducción de costes pasa primordialmente por la reducción de costes de construcción, la reducción de los plazos de ejecución (que determinan las cargas financieras) y el mayor aprovechamiento de la central, aumentando su disponibilidad.

La medida que se ha mostrado más eficaz para conseguirlo es la estandarización, la adopción de diseños modulares aplicados a un gran número de centrales. Abarata por una parte los costes de diseño y construcción de la central, pudiéndose alcanzar globalmente en ellos reducciones entre el 24 y el 38 por ciento. Por otra parte acorta los plazos de construcción. El efecto combinado de estas dos reducciones puede suponer ahorros del 50 por ciento. La comparación de costes de centrales francesas, realizadas de acuerdo con este principio, con los de centrales norteamericanas confirma estas cifras. Adicionalmente, la estandarización facilita el mantenimiento de las centrales, lo que repercute en una reducción de los costes correspondientes y en la consecución de una mayor disponibilidad.

1. Muertes probables por megawatt-año producido en diferentes sistemas energéticos. Para cada sistema la probabilidad queda determinada dentro de un rango, representando la línea de cierre superior el límite máximo y la línea rayada interior el mínimo. (De H. Inhabert, Energy Risk Assessment, *1984.)*

Aumentar el aprovechamiento de los recursos

El uranio está presente en la corteza terrestre en una proporción de 4 partes por millón. Sin ser un elemento abundante lo es más que otros a los que estamos habituados, como la plata o el mercurio; la corteza terrestre contiene más de 100 billones de toneladas. Sin embargo, se encuentra repartido de una forma muy homogénea, por lo que sólo en un número reducido de yacimientos es económicamente explotable a los precios actuales. Por ello sus reservas son limitadas. Si se utilizan en los actuales reactores, representan un 4 por ciento de los recursos totales de combustible. Esta cifra es coherente con el papel que desempeña hoy la energía nuclear.

El uranio presente en la naturaleza sólo contiene un 0,7 por ciento de uranio 235, el elemento fisionable. El 99,3 por ciento restante es uranio 238, que no se fisiona. El aprovechamiento total del uranio exige la utilización de reactores rápidos reproductores. En ellos, por cada átomo de uranio 235 que se fisiona se convierte más de un átomo de uranio 238 en otro elemento fisionable, el plutonio 239; de esta forma se consigue quemar la totalidad del uranio, y no sólo una pequeña parte, como en los actuales reactores térmicos. Utilizadas de esta forma, las reservas de uranio pasan a convertirse en las primeras de combustible, representando el 61 por ciento del total.

El reto tecnológico desde este punto de vista estriba en el desarrollo de centrales dotadas de reactores rápidos reproductores que sean económicamente rentables. En la actualidad ya existe un primer modelo a gran escala, el Superfénix francés de 1500 megawatt. Los nuevos desarrollos, más económicos, pueden aparecer hacia la primera década del próximo siglo.

Reducir el impacto ambiental

La utilización de la energía desprendida en las reacciones químicas y nucleares conlleva la producción de residuos que plantean problemas ambientales. En la combustión se produce anhídrico carbónico y óxidos de azufre y de nitrógeno, que son emitidos a la atmósfera. Salvo las escorias, no existe acumulación de residuos indeseables en este tipo de instalaciones y sí emisión continua de contaminantes gaseosos.

Antes bien, en las centrales nucleares, los elementos radiactivos producidos quedan retenidos en las vainas metálicas de los elementos de combustible. En mucha menor extensión se producen también sustancias radiactivas por la activación de diversos materiales en la vasija del reactor. No obstante, la actividad liberada al medio ambiente, a causa del funcionamiento normal de las centrales nucleares, es extremadamente baja y perfectamente controlada. El problema principal es la acumulación de residuos.

El anhídrido carbónico, producto de la combustión, es el responsable del 50 por ciento del efecto de invernadero. Junto con otros gases actúa como la cristalera de un invernadero, permitiendo el paso de la radiación térmica de onda corta, procedente del sol, y absorbiendo la de onda larga, emitida por la superficie terrestre. Así se produce un balance neto para la tierra que se traduce en un incremento paulatino de la temperatura media de la atmósfera.

La concentración de anhídrido carbónico en la atmósfera pasó de 290 partes por millón en 1900 a 315 en 1958 y a más de 350 en la actualidad. Paralelamente, la temperatura media terrestre aumentó durante medio siglo en unos 0,5 grados y, de seguir la actual tendencia, el recalentamiento global se situaría entre 1,5 y 4,5 grados en los próximos 30 años. Este fenómeno podría ocasionar un incremento en el nivel del mar por fusión parcial de los casquetes polares y cambios climáticos. Conscientes de esta amenaza, la Conferencia de Toronto (junio de 1988) reunió a más de 300 científicos y autoridades de 48 países. Entre sus conclusiones se fija como un objetivo inmediato la reducción de las emisiones de anhídrido carbónico en un 20 por ciento con respecto a las de 1988, para el año 2005. Para ello se establecen medidas de fomento del ahorro energético y el desarrollo de fuentes de energía no contaminantes. Entre éstas se pone de especial relieve la denominada tecnología nuclear segura.

Anualmente se emiten a la atmósfera, a causa de las combustiones, unos 65 millones de toneladas de azufre, en forma de anhídrido sulfuroso. Este se oxida y es absorbido por el vapor de agua transformándose en ácido sulfúrico. Debido a que estas transformaciones tienen lugar a cientos o miles de kilómetros, la distribución puede afectar a zonas muy extensas, alejadas de las fuentes. La lluvia elimina el ácido formado y lo deposita sobre el terreno, afectando a la vegetación más vulnerable; fenómeno conocido como lluvia ácida.

Así, el agua pura en equilibrio con el anhídrido carbónico atmosférico alcanza un *p*H de 5,6 próximo al valor neutro de 7. Sin embargo, existen vastas regiones del hemisferio Norte que registran lluvias con un *p*H de 4 o inferior. La península Escandinava y la República Federal de Alemania constituyen un ejemplo de esta realidad.

ALEMANIA R.F.	1,68
BELGICA	1,62
ESPAÑA	1,19
FINLANDIA	1,33
FRANCIA	1,80
HOLANDA	1,31
ITALIA	1,41
JAPON	1,37
REINO UNIDO (1)/(2)	1,40/1,71

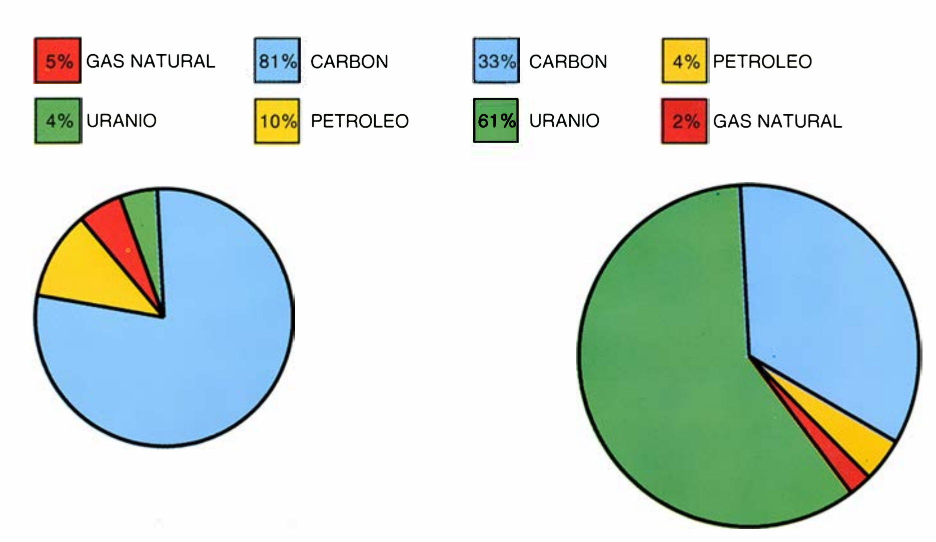
(1) Central de Sizewell
(2) Siguiente central duplicada.

2. Relación entre los costes de la generación de energía eléctrica en centrales de carbón respecto a las nucleares. (Estudio de la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE para centrales que inicien su operación en 1995.)

Por otra parte, el anhídrido sulfuroso se combina con partículas de polvo y aerosoles de diversa naturaleza, como las cenizas volantes y el hollín ácido, contribuyendo de modo notable a la formación de la neblina fotoquímica ("smog"). Esta circunstancia es sumamente perjudicial para los enfermos crónicos del aparato respiratorio y es responsable de numerosos episodios de contaminación aguda, como los del valle del Mosa, Donora y Londres, entre otros, con una notable mortalidad entre la población crítica.

La radiactividad generada en una central nuclear queda fundamentalmente acumulada en los elementos de combustible agotados, cuyo aprovechamiento y aislamiento constituye la última etapa del ciclo del combustible nuclear. Si se procede al tratamiento del combustible en las plantas de reelaboración a fin de extraer el uranio, el plutonio y otros transuránidos útiles, con el propósito de utilizarlos de nuevo, el ciclo se denomina cerrado, siendo los residuos radiactivos los desechos de esta operación. Si se considera al combustible irradiado como un desecho, prescindiéndose de su posterior reelaboración, el ciclo se denomina abierto. En ambos casos los residuos son de alta actividad y su gestión segura supone un esfuerzo tecnológico.

El objetivo de esta gestión es la de garantizar, en el presente y en el futuro, que no exista agresión contra el hombre, el medio ambiente y los recursos naturales. Ello se ha traducido en ambiciosos programas de investigación supranacionales y decisiones políticas de gran alcance. En este sentido,



3. Recursos mundiales de combustibles probados y adicionales. El círculo pequeño supone la utilización del uranio en los actuales reactores térmicos. El grande, la utilización de reactores rápidos reproductores.

los gobiernos han puesto la gestión de los residuos radiactivos bajo la supervisión de empresas u organismos estatales con control directo de la administración pública.

La estrategia global es la de interponer una serie de barreras artificiales que aíslen los residuos radiactivos del medio ambiente. La primera barrera consiste en inmovilizar los residuos en una matriz sólida, estable y duradera, como la vitrificación o la formación de otros conglomerados. La segunda consiste en un contenedor metálico, que constituye una frontera impermeable. Se denomina tercera barrera a la obra de ingeniería que almacena los residuos, con sus blindajes, estructuras y salvaguardias tecnológicas. Por último, constituye la cuarta barrera la formación geológica donde se ubica la instalación, cuya naturaleza y morfología garantiza la ausencia de fenómenos disruptivos en millones de años.

Existe una decidida voluntad internacional de colaboración, en la que se comparta la financiación de proyectos y programas de investigación, que resultarían sumamente gravosos para un solo país, y una política de clara transparencia informativa. Tenemos un ejemplo de esta cooperación internacional en el programa de investigación y desarrollo del Consejo de las Comunidades Europeas, en el que participan más de 400 científicos, con un presupuesto anual de unos 40 millones de ECU.

Aumentar la seguridad

El hombre tiene que arrostrar riesgos en todas sus actividades, pero esta actitud ha permitido su desarrollo y aumentado su esperanza de vida.

Todas las fuentes energéticas presentan riesgos. Riesgos en la construcción de las instalaciones que se precisan, riesgos en la extracción y el transporte de los materiales que se utilizan, riesgos en las emisiones y accidentes que pueden producirse en su operación.

Percibimos el riesgo de forma subjetiva, lo valoramos en función de nuestros hábitos. Ponderamos la importancia de unos y rebajamos e incluso despreciamos la de otros. Sin embargo, la evaluación objetiva de riesgos es importante para analizar estrategias de desarrollo.

En el terreno energético no han faltado análisis de riesgos. Iniciados en forma parcial, para determinados aspectos, se han convertido posteriormente en análisis globales de las distintas fuentes energéticas.

El gas natural ocupa la primera posición como fuente energética con menor riesgo global, seguida de la energía nuclear. Le siguen las energías renovables y, finalmente, con mayores riesgos, el petróleo y el carbón.

Pero independientemente de todos los análisis, mejorar la seguridad es el tema crítico de la energía nuclear, el que puede decidir su aceptación. La repetición de un accidente como el de Chernobil, sin poderlo atribuir esta vez a una deficiencia de diseño única, que permitió a un equipo de operadores incompetentes producir un desastre, el máximo que puede desencadenarse en una central nuclear, podría acabar con la energía nuclear. Esto, que no tiene parangón en ninguna otra industria, supone el mayor reto para los diseñadores y los operadores de centrales nucleares.

Desde el punto de vista organizativo, la última medida que se ha emprendido ha sido la extensión mundial de la cooperación de toda la industria para asegurar el reconocimiento, a ese mismo nivel, de normas de diseño, construcción, operación y formación para mantener la seguridad y permitir el máximo intercambio de experiencias de explotación. Esta cooperación se ha formalizado el pasado año con la constitución de la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO).

Desde el punto de vista del diseño, el reto estriba en desarrollar reactores intrínsecamente seguros en los que, por una parte, su propia constitución atenúe las situaciones anormales o accidentales, tendiendo a restituirse un funcionamiento seguro sin necesidad de operación automática o manual y, por otra parte, los sistemas de salvaguardias, destinados a lograr que se mantengan íntegras las barreras de contención que confinan los productos radiactivos, sean pasivos y no necesiten de la actuación de ningún elemento.

La inmensa mayoría de los fabricantes está procediendo al estudio y diseño de prototipos de estos reactores. Se trata en general de reactores más pequeños, lo que facilita la utilización de elementos de seguridad pasivos, la reducción de la densidad de potencia y el incremento de los márgenes de diseño, amén de restringir el inventario radiactivo del reactor. Además facilita su contracción modular y estandarizada.

La colaboración internacional en este aspecto es asimismo fundamental y es de destacar la iniciativa de la Sociedad Nuclear Soviética en pro de acuerdos entre las distintas sociedades nucleares de los países europeos. (Ricardo J. Granados y Antonio Senye, de la Comisión de Energía de la Asociación de Ingenieros Industriales de Cataluña.)

Niego la mayor: filósofos contra físicos

Los filósofos consideran que los físicos teóricos, armados de una profundidad que reta toda intuición y provistos de un formidable arsenal matemático, se mueven seguros y son peligrosos, por lo que suelen evitar competir en su campo. Huw Price, filósofo de la Universidad de Sidney, muestra un talante diferente. Disiente de Stephen W. Hawking, uno de los cosmólogos de mayor predicamento, sobre la explicación de la flecha del tiempo dada por este último.

El tiempo ocupa una posición extraña en el esquema cosmológico de las cosas. Casi todas las leyes físicas permiten que el universo funcione hacia adelante lo mismo que hacia atrás. La excepción más importante está en la

tendencia inexorable al crecimiento del desorden o entropía del universo. En su libro *Historia del tiempo*, Hawking argumenta que la tendencia hacia una mayor entropía subyace en la experiencia psicológica de lo que entendemos por tiempo. Esta conexión la establece observando que los seres vivos existen y graban sus memorias, obteniendo así una sensación de tiempo, gracias a que superan la onda ascendente de entropía en una región local. Para hacerlo, utilizan la energía suministrada por el sol. De acuerdo con Hawking, la pregunta más profunda que subyace debajo de nuestra percepción del tiempo será por qué el universo en este estadio de su evolución contiene estructuras ordenadas como el sol, en vez de contener, por ejemplo, sólo radiación totalmente desordenada.

Como la mayoría de los cosmólogos, Hawking cree que las fuerzas conocidas de la naturaleza pueden explicar las galaxias, las estrellas y otros sistemas ordenados, sólo si inicialmente se produjo una gran explosión (el "big bang"), que señaló el instante de arranque de la rápida expansión del universo a partir de un estado muy caliente, denso y bastante bien organizado. Hawking y sus partidarios piensan también que el desorden se difundirá hasta que el universo llegue a convertirse en un vacío casi homogéneo, que terminará por contraerse, acabando en un gran colapso. Por consiguiente, para Hawking el misterio del tiempo se recoge en la cuestión de por qué el universo está ordenado en un extremo del tiempo, el de la gran explosión, y desordenado a la hora del gran colapso. ¿Por qué la película épica de la naturaleza no discurre al revés?

Hawking encuentra su respuesta en un modelo cuántico-gravitatorio del universo: modelo híbrido que combina la teoría de la relatividad y la física cuántica. Propone que los cosmólogos concentren sus esfuerzos en un tipo particular de modelo cuántico-gravitatorio, en el cual la historia del universo es finita en extensión y en tiempo, aunque carente de límites. Un universo de este estilo no tiene extremo porque el espacio-tiempo es curvo, de modo que una línea recta acaba encontrándose a sí misma. Hawking calcula que esta teoría de la "frontera inexistente", unida a otras suposiciones, lleva a la conclusión de que el universo real es, con mucho, el más probable: ordenado en un extremo del tiempo, se expande hasta un punto de máxima extensión y entonces se contrae, manteniendo, sin embargo, su tendencia al desorden durante todo el tiempo.

Es en este punto donde Price acomete contra el complicado parche cósmico del inglés. En las páginas de *Nature* sugiere afablemente que *Historia del tiempo* no consigue explicar cómo encuentra Hawking la flecha del tiempo inmersa en su teoría de la "frontera inexistente". De acuerdo con Price, el libro importuna al lector con un misterio al que le falta un desenlace. "Es como si acusáramos al mayordomo de haber cometido el crimen sin saber cómo lo hizo."

Price argumenta que la explicación de Hawking para la flecha del tiempo supone precisamente lo que intenta demostrar: que un extremo del tiempo es diferente del otro. Price mantiene que, en una discusión acerca del tiempo, las condiciones finales externas tienen la misma validez que las condiciones iniciales. En su opinión, cualquier explicación del estado inicial tan ordenado en el momento de la gran explosión, según aparece en el modelo de Hawking, debe aplicarse igualmente para el gran colapso. Y si el modelo de Hawking supone algún tipo de asimetría temporal, afirma Price, no explica la flecha del tiempo.

Hawking, sin embargo, se mantiene en sus trece. Nos escribe a *Investigación y Ciencia* que la propuesta de la "frontera inexistente" explica, de hecho, la flecha del tiempo porque vaticina que un universo de cualquier tamaño tiene dos grados de desorden distintos altamente probables. En el estado de poco desorden, la entropía crece al expandirse el universo; en el estado de alto desorden, éste crece cuando el universo se contrae. Hawking adscribe el estado poco desordenado a la historia primitiva del universo y asocia el estado de gran desorden con un estado posterior al comienzo de la contracción del universo. Según un partidario de la teoría de Hawking, "no hace falta suponer el tiempo".

Otros cosmólogos no están tan seguros. Don N. Page, de la Universidad estatal de Pennsylvania y colaborador de Hawking, observa que no está claro qué fracción de los modelos simples del universo tienen flecha del tiempo. "Si la propiedad de ser simples por sí misma predice la flecha del tiempo, entonces la propuesta de Hawking de la inexistencia de fronteras podría explicar bien poco."

Sin embargo, Page confía en que los trabajos futuros aclaren el panorama. "Puede ocurrir que los argumentos de Hawking no sean ciertos por otros motivos, pero no creo que el problema esté en la introducción camuflada de la flecha del tiempo."

Ciencia y empresa

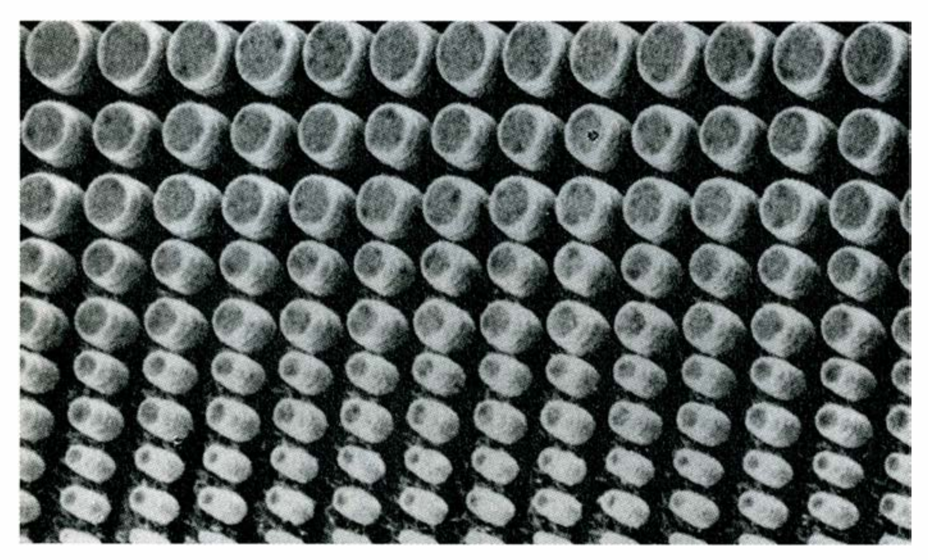
Fibra óptica en casa...

Los cables de fibra óptica se están introduciendo en los hogares. Durante los últimos años, las compañías de telecomunicaciones han tendido cables, a través de los continentes y bajo los océanos, para enviar información a larga distancia. Las compañías telefónicas regionales han enlazado con cables de fibra sus centrales. Ahora, las compañías locales y los fabricantes de equipos trabajan ya conjuntamente para llevar las fibras hasta la mismísima puerta del usuario.

El poblado global del comisario McLuhan está a la vuelta de la esquina. Los enlaces ópticos, capaces de transportar muchas más señales que los cables de cobre, pondrán a disposición de los hogares ingentes cantidades de información, imágenes y sonidos. Para los fabricantes de equipos de telecomunicaciones, las fibras en casa representan un extraordinario mercado potencial que, según un informe del año pasado redactado por el Consejo Nacional de Investigaciones, totalizaría al menos 100.000 millones de dólares en los EE.UU. No obstante, los poblados globales requieren componentes fotónicos –dispositivos que remplazan los electrones por fotones y son el torrente sanguíneo de la red de comunicaciones óptica– de bajo coste y eficaz funcionamiento. Entre ellos, se encuentran los cables de fibra óptica, transmisores y receptores basados en el láser, amén de una batería de dispositivos para comprimir las señales y regenerarlas después.

Queda todavía, sin embargo, mucho trecho por delante. Las mismas empresas norteamericanas, incluida AT&T, apenas han avanzado en su fabricación, afirma Stewart D. Personick, de Bell Telecommunications Research, uno de los que participaron en el informe sobre fotónica del Consejo Nacional de Investigación. Retraso que puede tener sus consecuencias en la pugna por el mercado. "Hay cinco o seis grandes empresas japonesas interesadas por el mercado de la fibra en casa", dice David V. Lang, de los Laboratorios Bell de AT&T. "No podemos luchar con el Japón nosotros solos."

Nadie pone en duda la pericia estadounidense en investigación fotónica. Gran parte de la tecnología inicial se debe a ingenieros norteamericanos, que poseen patentes decisivas en láseres y fibras ópticas. Las investigaciones actuales de los EE.UU. se cuentan entre las mejores del mundo. En una reunión en Japón, este último verano, un grupo de ingenieros de Bell Communications Research y de los Laboratorios Bell de AT&T dejó asombrados a sus colegas internacionales comprimiendo dos millones de láseres en un diminuto substrato. Aunque en fase de ensayo, la técnica para construir tales microcircuitos puede convertirse, muy pronto, en un paso crucial hacia una mejor integración de la electrónica con la óptica.



1. LASERES MICROSCOPICOS, de uno a cinco micrometros de diámetro, que fueron recortados de un substrato semiconductor multicapa por un grupo de investigadores de Bell Communications Research y de los Laboratorios AT&T Bell. Un millón de láseres ocupa un centímetro cuadrado del microcircuito.

En los últimos años, AT&T ha demostrado su poderío en fibras ópticas consolidando un potente negocio de equipos de larga distancia. Aparte del tendido de cables de larga distancia en los EE.UU., AT&T ha conseguido contratos para tender un segundo conjunto de cables ópticos a través de los océanos Atlántico y Pacífico a principios de los años noventa. El gigante japonés de telecomunicaciones, NTT, ha elegido también a AT&T para montar una red de larga distancia y alta velocidad (2,5 gigabits por segundo) en el Japón. Pero AT&T se enfrenta a una competencia mucho más dura en la fabricación de otros componentes fotónicos.

El coste constituye la piedra de toque de la industria de las "fibras en casa". Hasta este año, las sucursales de Bell se han resistido a instalar redes de fibra en los hogares porque era demasiado caro. Las inversiones en líneas de fibra de larga distancia se pueden justificar por la capacidad adicional que tales redes proporcionarán. Pero con la caída del precio de las fibras, ciertas compañías regionales han iniciado varios proyectos piloto de fibras ópticas para los hogares. Hasta ahora, sólo algunos fabricantes han ofrecido redes completas de fibra para los hogares. Los primeros de la lista han sido AT&T y la canadiense Northern Telecom.

NYNEX, otra gran compañía de telecomunicaciones, recurrió a una empresa pequeña, Raynet, de Menlo Park, cuando comenzó su primer proyecto de fibras para el hogar. Raynet ofrece una topología poco corriente que dice ser más barata que la arquitectura de AT&T. En la concepción de esta última, los terminales remotos convergen en una central. Los terminales sirven a una distribución de cajas optoelectrónicas montadas en las aceras, en las que las señales fotónicas se conmutan eléctricamente. Estas se convierten, a su vez, en centros unidos,

por medio de radios de fibra óptica, a cada uno de los hogares de la red.

Raynet ha ideado una arquitectura de transporte urbano. Un cable de fibra óptica corre por una determinada zona; conectados a él hay hasta dos decenas de enlaces que van a nudos en las aceras, cada uno de los cuales se conecta a tres o cuatro hogares. Esta topología reduce el número de equipos optoelectrónicos necesarios. Además, mientras que la arquitectura de AT&T lleva la fibra hasta cada puerta, Raynet confía el enlace de los nudos con las viviendas individuales a cables de cobre de alta velocidad. A distancias de hasta unos pocos centenares de metros, los cables de cobre pueden transmitir datos a unos 1,5 megabit por segundo. Con el tiempo, a medida que los precios de los dispositivos fotoelectrónicos bajen, estos cables de cobre serán sustituidos por fibras.

En su esfuerzo por abrirse camino en el mercado de fibras para el hogar, AT&T se apoya en su Centro de Tecnología del Estado Sólido, que inauguró el año pasado en Pennsylvania. A ese instituto se le ha encomendado acelerar la transición de los equipos desde la fase de proyecto hasta la de fabricación. Aunque el laboratorio está explorándolo todo, desde nuevos materiales fotónicos hasta subsistemas de componentes ópticos, busca en particular la mejor relación posible entre coste y prestaciones.

... y robots a domicilio

Cuando Joseph F. Engelberger dejó Unimation en 1984, anunció que se retiraba de la industria robótica y se compró un yate de vela. La navegación le duró dos meses. Ahora, el hombre a quien se atribuye haber encendido la chispa de la industria de la robótica, quiere poner un robot en cada hogar. "Quiero que friegue el suelo, haga la comida, lave el coche y cuide la seguridad de los bienes", afirma plenamente convencido.

Los amoríos de Engelberger con los robots comenzaron hace más de treinta años. En aquella época, sus ideas tropezaron con el escepticismo y la apatía; la fiebre de los robots prendió por fin en las postrimerías de los años setenta, pero desapareció prestamente. Las cosas comienzan a cambiar. Las ventas alcanzaron casi 290 millones de dólares en la primera mitad de 1989, mientras que en todo el año anterior fueron de unos 330 millones, sólo en los Estados Unidos.

Como Engelberger no se cansa de explicar, la industria robótica comenzó en una reunión social en Westport, Connecticut, un atardecer de 1956. George C. Devol, inventor de un sinfín de patentes, estaba lanzando sus últimas ideas acerca de un robot industrial. No había construido todavía ningún robot, ni había tenido suerte alguna tratando de convencer a las empresas para que invirtieran en uno. Pero encandiló la imaginación de Engelberger, entonces directivo de una empresa.

"Supongo que, envuelta en la bruma alcohólica, parecía mejor idea de lo que realmente era", confiesa Engelberger. En su época de estudiante en la Universidad de Columbia, Engelberger se había entusiasmado con las fantasías de Isaac Asimov sobre robots. Ahora estaba atrapado. Ya existían máquinas automatizadas dedicadas a una tarea única. Devol le hablaba de máquinas programables, capaces de acometer distintas tareas.

Después de visitar varias fábricas, Engelberger y Devol llegaron a la conclusión de que la industria automovilística estaba preparada para dar asilo a los nuevos operarios mecánicos. La construcción de automóviles, un proceso en cadena, requería maquinaria pesada y estaba, por ello, bien adaptado al empleo de potentes, aunque lentos, robots de un solo brazo. Todavía más importante, los obreros trabajaban en varios turnos. "Tratábamos de sustituir trabajadores para ahorrar sueldos", comenta Engelberger.

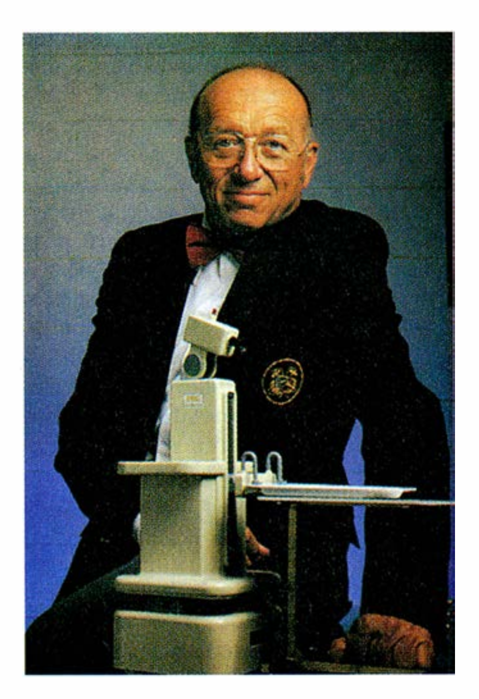
Hacia 1959, Engelberger y Devol habían conseguido bastante dinero para construir su primer robot, que fue entregado a una fábrica de General Motors en Nueva Jersey, en 1961. El Unimate, como Devol le llamó, era un robot hidráulico que gobernaba una troqueladora. Para "aprender" su oficio, el robot fue obligado a seguir detalladamente el proceso y así registrar magnéticamente lo que sucedía en cada fase.

Los pedidos llegaban con cuentagotas y de los sitios más inverosímiles. Entre los clientes de primera hora figuraban lo que Engelberger denomina "compradores irracionales", gente que sentía curiosidad por las nuevas herramientas y estaba impaciente por probarlas. En 1962, el presidente de Pullman Railcars, encantado con la idea de los robots, contribuyó con tres millones de dólares a la recién formada Unimation a cambio del 51 por ciento de la compañía. El primer éxito importante de Unimation llegó en 1966, cuando

General Motors adquirió 66 robots para tareas de soldadura por puntos en su nueva planta de Youngstown, en el estado de Ohio.

Engelberger ayudó también a echar los cimientos de la industria robótica japonesa. En 1967, su gobierno le pagó el vuelo en primera clase al Japón para dar unas conferencias sobre robots. "Cuando en los EE.UU. difícilmente conseguía reunir ocho o diez personas para escucharme, aparecieron allí 600 para una conferencia." (La audiencia estaba constituida por ingenieros y directivos importantes.) Hacia el final del viaje, Engelberger había llegado a un acuerdo para que Industrias Pesadas Kawasaki usara la tecnología de Unimation bajo licencia. "La licencia fue una buena idea", dice. Otros lo dudan, sobre todo ahora que el Japón domina ese campo. Pero Engelberger responde que los japoneses copiaron los robots construidos por otras pequeñas compañías norteamericanas.

Unimation tardó 14 años en ser rentable. Pero a principios del decenio de 1980 había acaparado más del 30 por ciento del mercado de la robótica y había colocado más de 7000 robots en las fábricas. Su línea Puma, que tenía juntas rotacionales y podía montar componentes o soldar costuras metálicas, ganó pronta aceptación. Los robots norteamericanos, japoneses y europeos se vendían muy bien. Antiguos ingenieros de Unimation establecían sus propias compañías. "Me sorprendería un crecimiento industrial inferior al 35 por ciento anual durante este decenio", escribió Engelberger en la revista *Industrial Robot*, en 1983.



2. UN ROBOT posa junto a su creador, Joseph F. Engelberger. El robot –uno de los primeros modelos– estaba proyectado para entregar las bandejas con la comida a los pacientes hospitalizados. Engelberger está trabajando en robots que fregarán los suelos. (Fotografía cedida por cortesía de Wayne Sorce.)

Por el horizonte, sin embargo, asomaron los nubarrones. Las rosadas estimas del futuro mercado atrajeron a demasiados fabricantes, dice Maurice J. Dunne, vicepresidente retirado de Unimation. Según Engelberger, las empresas grandes que irrumpieron en esta industria estaban dispuestas a absorber pérdidas para obtener negocios. Cuando General Motors cofundó GM Fanuc Robotics (con el fabricante japonés Fanuc), Unimation perdió el 60 por ciento de sus negocios, añade dolorido Dunne.

Westinghouse Electric compró, en 1983, Unimation por 107 millones de dólares. En un año, Unimation y la industria caían en barrena. Los críticos acusan a Unimation de no haber ido al paso de la tecnología; argumentan que debería haber sustituido el sistema hidráulico de Unimate por motores eléctricos y debería haber añadido más microelectrónica. A lo que Engelberger contesta: los primitivos Unimate estaban bien equipados para realizar muchas tareas; además, la división de la costa occidental de la compañía empleaba electrónica avanzada. (La división es ahora una compañía independiente, llamada Adept Technology y se ha convertido en uno de los principales fabricantes de robots para la industria electrónica.) Después de seis años, Westinghouse absorbió parte de Unimation y vendió el resto.

Engelberger, mientras tanto, estaba explorando los robots móviles con sensores de tacto y visión. Fundó Transitions Research Corporation, en Danbury, y empezó a trabajar en un robot que pudiera realizar faenas domésticas.

TRC ofrece varios prototipos; dos robots experimentales "HelpMate" recorren un hospital llevando la comida a los pacientes. Incluso usan los ascensores. En la oficina de TRC, un robot similar limpia con aspirador el suelo de una sala de estar simulada. Otro aspira a fregar los suelos. "Volviendo al sueño de Asimov", dice Engelberger, "una máquina es tanto más robótica cuanto más humana es."

Los recursos hídricos, amenazados

El crecimiento demográfico, la ignorancia y la pobreza, junto con prácticas agrícolas arcaicas, han puesto en peligro los recursos hídricos. Urgen medidas inmediatas

J. W. Maurits la Rivière

El agua es el componente característico de la Tierra. Sentó en el pasado las bases para la evolución biológica y sigue siendo hoy un elemento esencial para la vida. Tal vez constituya el don más preciado que la Tierra ofrece a la humanidad. Debiera suponerse, por tanto, que el hombre se mostrara respetuoso con ella en justa reciprocidad, procurando conservar sus reservas naturales y esforzándose por salvaguardar su pureza. Pero la verdad es que muchos países se han comportado de manera negligente y sin visión de futuro. Hasta el punto de que el devenir de la especie humana y de otras muchas puede verse comprometido, si no se produce una mejora sensible en la gestión de los recursos hídricos de la Tierra.

El agua dulce de lagos, arroyos, ríos y torrentes del mundo representa menos del 0,01 por ciento de la reserva total de agua del planeta. Para nuestra fortuna, esta provisión de agua dulce se repone sin cesar a través de la precipitación de vapor de agua de la atmósfera en forma de lluvia o nieve. Desgraciadamente, gran parte de esta precipitación se contamina, durante su caída, de gases y partículas que la actividad humana libera a la atmósfera.

El agua dulce fluye por la tierra y, en su camino hacia el océano, va cargándose de partículas y material disuelto, natural o procedente de los residuos de la sociedad. Cuando la densidad de población en el área de drenaje es baja, los materiales de desecho vertidos pueden ser degradados por microbios mediante un proceso de autopurificación natural. Sin embargo, cuando la capacidad de autopurificación del área de drenaje se ve superada, se acumulan grandes cantidades de estas sustancias de desecho en los océanos, donde pueden dañar la vida marina. El agua se evapora y entra en la atmósfera convertida en vapor. Gran parte del mismo vuelve a caer al océano; la parte que cae sobre los continentes constituye el valioso recurso renovable del cual depende la vida terrestre.

El Instituto de Recursos Mundiales estima que, cada año, retornan al mar, desde los continentes, 41.000 kilómetros cúbicos de agua; así equilibran el transporte de vapor atmosférico del mar hacia la tierra. Unos 27.000 kilómetros cúbicos, sin embargo, tornan al mar como escorrentía rápida (avenidas) no sujeta a control y otros 5000 kilómetros cúbicos fluyen al mar en áreas deshabitadas. De los 41.000 kilómetros cúbicos que retornan al mar, una parte, cuya cuantía se desconoce, queda retenida en el suelo absorbida por la vegetación.

Este ciclo deja unos 9000 kilómetros cúbicos directamente disponibles para la explotación humana mundial. Esto supone una abundante provisión de agua, suficiente en principio para abastecer a 20.000 millones de personas. Ahora bien, debido a que población y agua aprovechable se hallan irregularmente distribuidos, la disponibilidad local de agua varía de modo notable. Los balances entre evaporación y precipitación realizados país por país dividen el mundo entre países ricos y países pobres en agua. Islandia, por ejemplo, tiene un exceso de precipitación, que suministra 68.500 metros cúbicos de agua por persona y año. Por contra, los habitantes de Bahrain, no tienen ningún acceso al agua dulce natural y dependen de la desalinización del agua del mar. Además, las tasas de consumo por persona difieren de un país a otro: el estadounidense medio consume más de 70 veces la cantidad de agua al año que el de Ghana.

Aunque los usos a que se destina el agua cambian en función del país, la agricultura es la actividad de mayor consumo. En promedio global, el 73 por ciento del agua extraída de la tierra se destina a ese propósito. Casi 3 millones de kilómetros cuadrados de tierra —una extensión parecida a la de la India— se han convertido en regadíos, y cada año se añaden más aún, a un ritmo del 8 por ciento anual.

Las carencias de agua local pueden resolverse de dos maneras. Por un lado, con el aumento de los recursos a través de la construcción de presas en los ríos o mediante la explotación del

J. W. MAURITS LA RIVIERE es secretario general del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC), una organización con sede en París que promueve la cooperación internacional e interdisciplinar entre científicos. La Rivière ha tenido una distinguida trayectoria como profesor de microbiología ambiental y director del departamento de ingeniería ambiental en el Instituto Internacional de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (IHE) en Delft, Holanda. Después de doctorarse en microbiología por la Universidad Politécnica de Delft, permaneció un año en la Estación Marina Hopkins de la Universidad de Stanford, antes de volver al IHE.

1. FUGA DE PETROLEO de un sondeo de extracción y contaminación consiguiente de un arroyo cercano, en Oklahoma. Se ha formado una película viscosa en la superficie del agua, que tapiza incluso las orillas. La toxicidad del petróleo ha transformado el agua en inhabitable para la mayoría de los organismos y totalmente inapropiada para el consumo. Aunque este tipo de escape de petróleo es mínimo comparado con los posibles vertidos de un petrolero al mar, el ejemplo ilustra la amplia gama de actividades humanas que pueden perjudicar el suministro mundial de agua.



agua subterránea. Por otro, ateniéndose al suministro habitual, mejorando la eficacia de las técnicas de regadío o promoviendo una mayor dependencia de las importaciones de alimentos.

A pesar de tales esfuerzos, no hay duda de que el agua escasea cada vez más mientras crece la población, la industria y la agricultura. A medida que la demanda sobrepasa el suministro se van produciendo déficits importantes. El agotamiento de las aguas subterráneas constituye un fenómeno común en la India, China y los Estados Unidos. En la Unión Soviética, el nivel del mar de Aral y del lago Baikal está bajando drásticamente debido al desarrollo agrícola e industrial de las zonas circundantes. La beligerancia por el agua de los ríos internacionales (pensemos en el Nilo, el Jordán, el Ganges y el Brahmaputra) refleja la penuria del recurso.

Otro problema, producido en este caso por la sobreirrigación, nos lo plantea la salinización del suelo. Cuando el agua se evapora o es absorbida por las plantas, la sal se queda en el suelo. Si la tasa de deposición supera la velocidad del arrastre de la sal por el curso de agua, se acumulan los residuos salinos. Actualmente, más de un millón de hectáreas se ven sometidas cada año a la salinización; sólo en los Estados Unidos, ese problema afecta a más del 20 por ciento de las tierras de regadío.

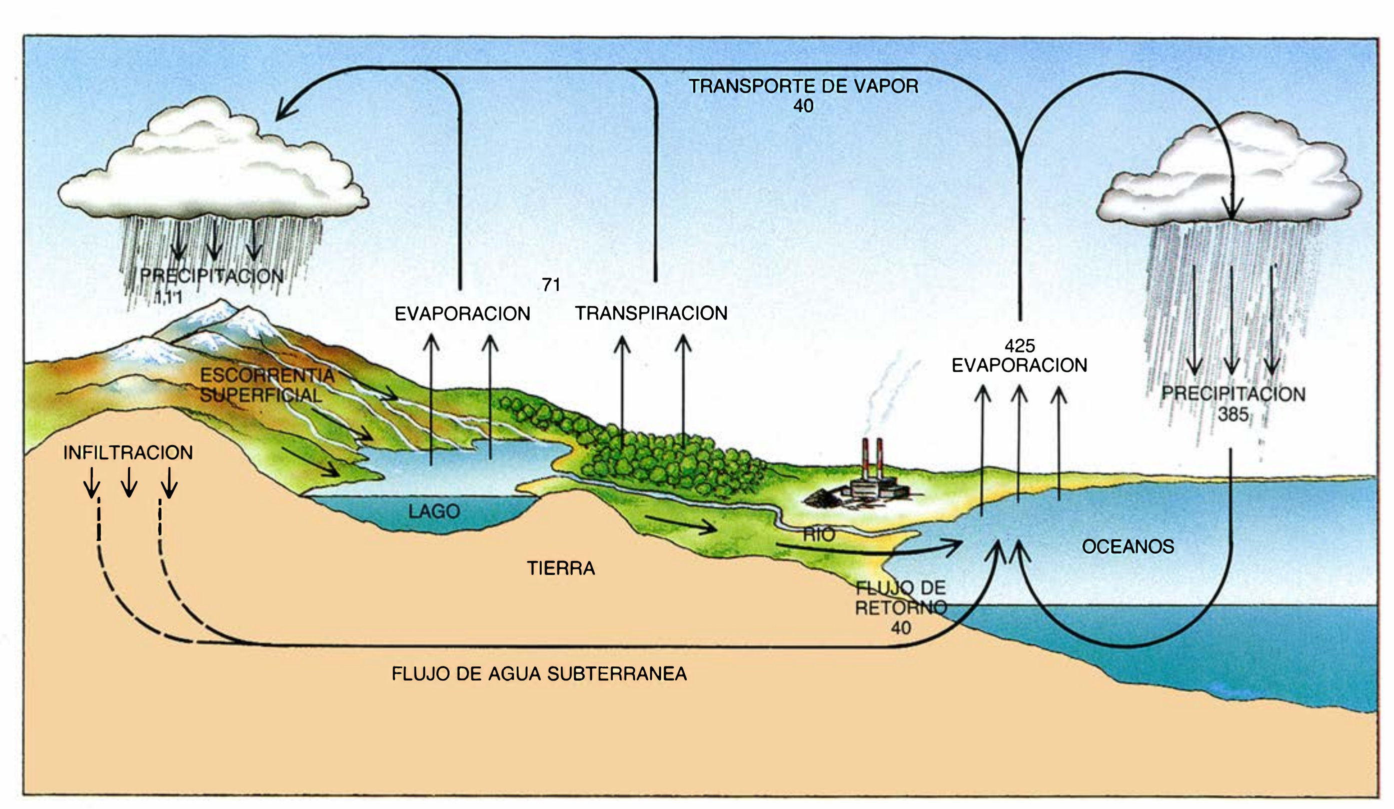
La actividad humana desarrollada en la cuenca de un río agrava a menudo los riesgos de inundación. La deforestación y la tala excesiva, amén de erosionar el suelo, fomentan la escorrentía. Los canales de navegación fluvial se dragan de vez en cuando, lo que puede exacerbar los desastres de la inundación al aumentar el volumen de agua que alcanza la llanura anegada.

Por último, y obviamente, cualquier actividad humana que acentúe el efecto de invernadero, y el consiguiente cambio climático, repercutirá en el ciclo global del agua. Una elevación del nivel del mar que prevea de 0,5 a 1,5 metros para el próximo siglo, no sólo plantearía un problema de inundación costera, sino que provocaría también la salinización de los recursos hídricos costeros; crearía nuevas zonas húmedas, a la vez que destruiría otras existentes, e incrementaría la proporción de agua salada con respecto al agua dulce del planeta. La precipitación global podría elevarse del 7 al 15 por ciento; las variaciones geográficas escapan a todo pronóstico.

Asegurar el suministro adecuado no es el único problema que el agua plantea a muchos países. Deben controlar la calidad de la misma. En su paso a través del ciclo hídrico, el agua se contamina con dos tipos de residuos. Existe el tipo de residuo orgánico tradicional: los excrementos humanos y animales y los restos de fibra de la agricultura (las partes desechadas —a menudo más de la mitad— de las plantas cultivadas). Por otro lado, están los desperdicios generados por una amplia gama de procesos industriales y por la transformación, tras un corto o largo período de vida, de los productos industriales.

Aunque los residuos orgánicos son completamente biodegradables, suponen un contratiempo importante que, en algunos lugares, adquiere proporciones desmesuradas. La excesiva biodegradación produce la caída de oxígeno de lagos y ríos. Los excrementos humanos contienen algunos de los contaminantes más perniciosos conocidos, entre ellos microorganismos patógenos transportados por el agua: los agentes del cólera, fiebre tifoidea y disentería.

Los residuos industriales acarrean metales pesados y considerables cantidades de productos químicos sintéticos, como los pesticidas. Estas sustancias se caracterizan por su toxicidad y persistencia: no se degradan fácilmente en condiciones naturales, ni tampoco en las plantas tradicionales de tratamiento



2. CICLO GLOBAL DEL AGUA y sus trayectorias: precipitación, evaporación y transporte de vapor. Precipita del cielo en forma de lluvia o nieve, cayendo en buena parte sobre los océanos; retorna a la atmósfera por evaporación. Una porción fluye por tierra hacia el mar como escorrentía o como agua subterránea; en la otra dirección las corrientes atmosféricas transportan el vapor del mar hacia la tierra. El flujo neto se mide en miles de km^3/año.

de aguas residuales. Algunos materiales industriales (cemento, papel, vidrio, hierro y ciertos plásticos) son bastante inocuos, debido a su naturaleza inerte, biodegradable o, al menos, no tóxica.

Los residuos llegan a los ríos y lagos en los vertidos procedentes de fuentes definidas (tuberías de drenaje y cloacas) y a través de fuentes difusas (pesticidas y fertilizantes contenidos en el agua de escorrentía). Arriban también siguiendo vías indirectas, verbigracia, por lixiviación del agua en suelos contaminados, transportando los agentes contaminantes al lago o al río. La verdad es que los vertederos de residuos químicos tóxicos que se sitúan en tierra firme se han convertido en fuente preocupante de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. Los barriles metálicos que contienen los productos químicos son verdaderas bombas de relojería que explotarán cuando se oxiden y corroan del todo. Los incidentes de Lekkerkerk en Holanda y Love Canal en los Estados Unidos evidencian que la contaminación de este tipo continúa en todo el mundo en miles de vertederos de residuos químicos.

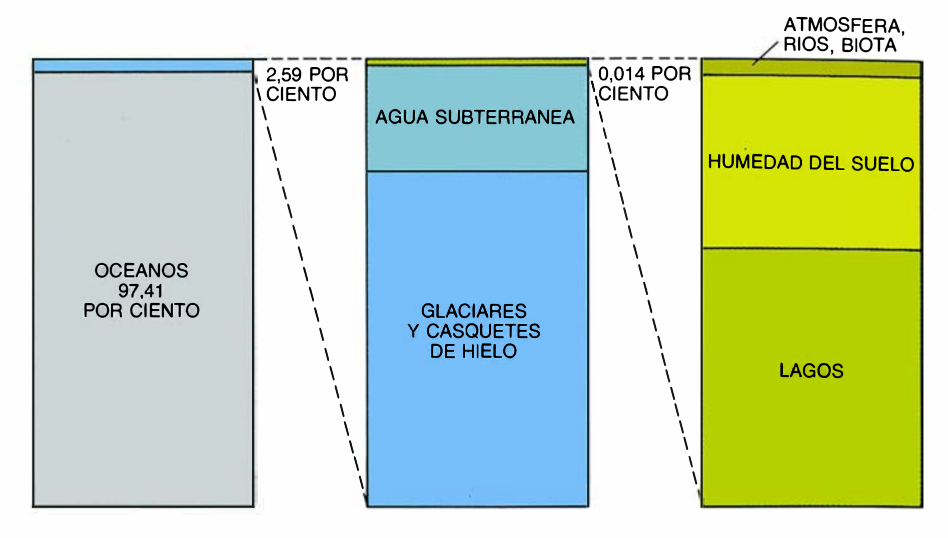
Algunos contaminantes entran en el ciclo del agua por vía atmosférica. Quizás el más conocido sea el de los ácidos que se forman a raíz de la emisión de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre procedentes de la industria y de los vehículos a motor. La deposición de ácidos puede ser "seca" (cuando los gases establecen contacto directo con el suelo o la vegetación) o "húmeda" (cuando la lluvia disuelve el ácido); ella es la causa de la acidificación de los lagos de baja alcalinidad en todo el mundo industrializado. La lluvia ácida arrastra también ciertos iones cargados positivamente del suelo; en algunos ríos y lagos los iones alcanzan concentraciones letales para la piscifauna.

En áreas de ganadería intensiva, el amoníaco desprendido del estiércol se libera, en parte, a la atmósfera y, en parte, se convierte en nitratos solubles por acción de los microorganismos del suelo. Los nitratos, dotados de una alta movilidad (son solubles en el agua y no se ligan a las partículas del suelo), se han erigido en uno de los principales contaminantes del agua subterránea, alcanzando a menudo concentraciones que exceden las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud.

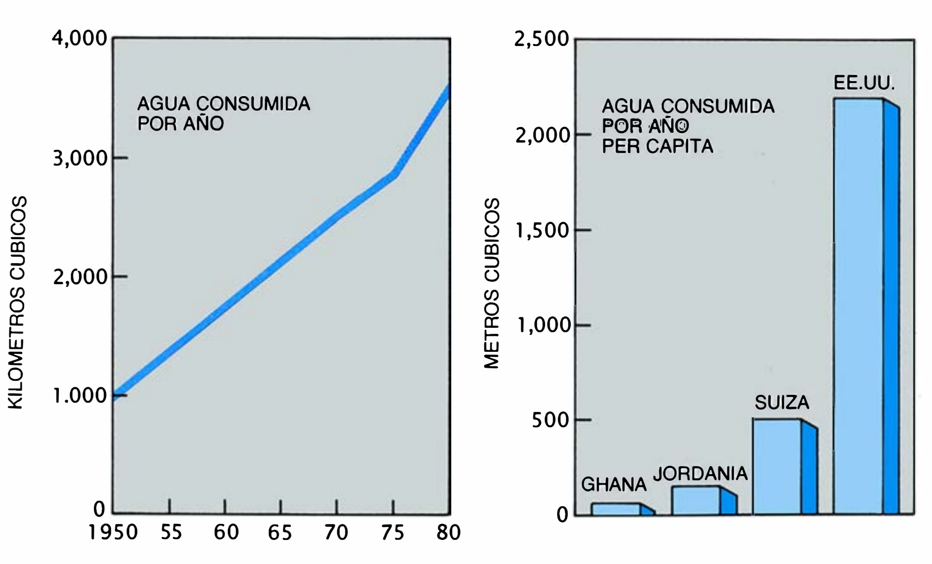
El aire constituye otro vehículo de transporte de contaminantes, verbigracia, aventando las cenizas de las centrales térmicas de carbón o dispersando los pesticidas. Estos contaminantes pueden acarrearse muy lejos del punto de origen para caer, por último, sobre lagos y ríos.

Se ha detectado recientemente una forma más de contaminación del agua. Me refiero a la acumulación de metales pesados, nutrientes y productos químicos tóxicos en el lodo del fondo de los deltas y estuarios de ríos altamente polucionados, como el Rhin. A causa de su alto contenido contaminante, los sedimentos dragados no sirven para proyectos de allanamiento de tierras en áreas urbanas o agrícolas. Más aún, existe siempre el riesgo de que los procesos naturales o la actividad humana puedan desencadenar las reacciones químicas que movilicen los contaminantes, facilitando su solubilidad y abriéndoles el camino para su dispersión por zonas extensas.

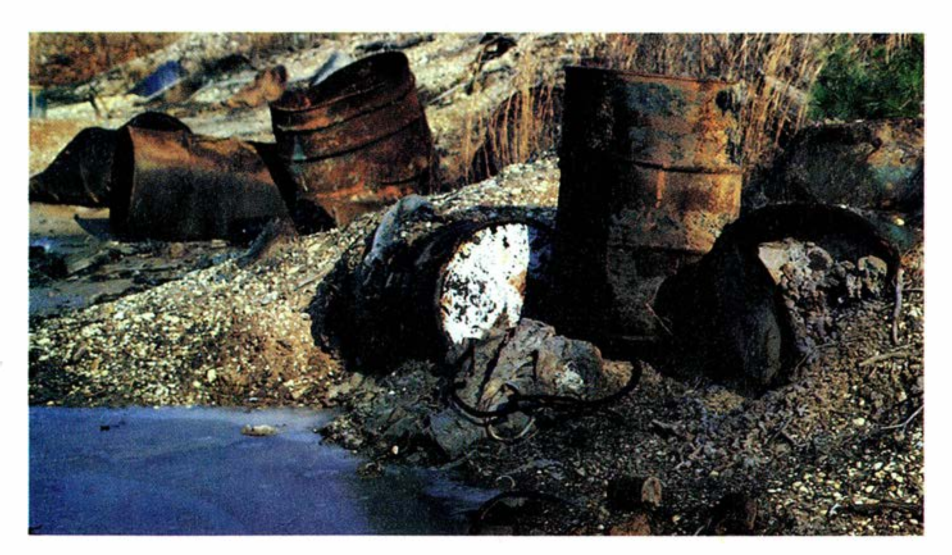
La calidad de las aguas continentales no sólo depende de la cantidad de desechos generados, sino también de las medidas de descontaminación que se pongan en funcionamiento. La eficacia de la lucha por la calidad del agua varía de un país a otro, pero puede generalizarse en una fórmula conceptual propuesta por Werner Stumm y sus colaboradores del Instituto Federal Suizo para los Recursos Hídricos y el Control



3. DESIGUAL DISTRIBUCION DEL AGUA en el planeta Tierra. La mayor parte (97,41 por ciento) corresponde a los océanos (*gris*). Sólo una pequeña fracción (2,59 por ciento) está en la tierra (*azul*), porción de la que, en una cuantía muy alta, no puede disponerse, dado que se encuentra retenida en forma de hielo y nieve o como agua subterránea. Unicamente el 0,014 por ciento del total de agua en la tierra se halla a disposición del hombre y el resto de los organismos (*verde*). (Esquema de Gabor Kiss.).



4. CRECIENTE CONSUMO GLOBAL DE AGUA (*izquierda*); obedece fundamentalmente al aumento demográfico y al de la cantidad de agua per cápita utilizada para la agricultura y la industria. A pesar de que existe suficiente agua dulce disponible (9000 kilómetros cúbicos), se requiere una gestión eficaz para asegurar un adecuado suministro en el futuro. Las tasas de consumo per cápita varían drásticamente de un país a otro (*derecha*); el estadounidense medio consume 70 veces más agua que el habitante de Ghana.



5. VERTIDOS DE PRODUCTOS QUIMICOS TOXICOS, una preocupante fuente de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. Los puntos de vertidos ilegales, como éste, se escapan fácilmente a todo control. Al oxidarse los bidones metálicos y liberar su contenido pueden provocar daños importantes: contaminación de las aguas superficiales y, con el tiempo, de las aguas subterráneas por percolación.

de la Contaminación del Agua en Zurich. A tenor de la fórmula, la carga de contaminación de la cuenca de un río depende de la población de la cuenca, el producto nacional bruto anual per cápita, la eficacia de las medidas de descontaminación y el caudal del río.

La mayoría de los ríos del mundo industrializado, donde la población y el PIB per cápita son estables y los procesos de descontaminación tienden a ser bastante eficaces, sufren, sin embargo, la contaminación de residuos tradicionales e industriales. A principios de la década de los ochenta, se observó, ello no obstante, una ligera estabilización —o incluso mejoría— de los niveles de contaminación. (Los métodos para el tratamiento de residuos tradicionales insisten sobre todo en la sedimentación y en la degradación microbiana aeróbica y anaeróbica, que son, en definitiva, formas intensificadas de autopurificación natural.) Los métodos para degradar contaminantes inorgánicos, como los metales y los productos químicos tóxicos, aunque se están refinando, no se han revelado tan prometedores.

En la cuenca de un río donde se compense un aumento de la actividad industrial con un mejor tratamiento de los residuos, cabe mantener un nivel de calidad de agua aceptable. Pero el equilibrio entre contaminación y descontaminación es precario. Basta un vertido accidental importante, como el que siguió al incendio de la fábrica de Sandoz en el Rhin, en Suiza, en 1986, para desencadenar la mortandad de organismos acuáticos y obligar a las plantas purificadoras de agua potable situadas curso abajo del punto del accidente a cerrar sus tomas.

En la mayoría de los países que están entrando en el mundo industrializado, la contaminación orgánica y fabril de los ríos va en aumento. Mientras el PIB per cápita se eleva rápidamente (lo mismo que la población, aunque en menor medida), los esfuerzos de descontaminación, por el contrario, se suelen descuidar. Estos países han concedido prioridad a la industrialización sobre la reducción de la contaminación. La consecuencia inmediata es que, en algunas regiones (el este de Asia, por ejemplo), la degradación de los recursos hídricos se considera actualmente el problema ambiental más grave.

En los países retrasados, donde la demografía crece y el tratamiento de los residuos es virtualmente inexistente, la contaminación del agua por residuos orgánicos constituye un fenómeno generalizado. Por culpa de ello, millones de personas —niños, en particular— mueren cada año de enfermedades asociadas al agua, que podrían evitarse con medidas sanitarias adecuadas. Estos países sufren todavía enfermedades erradicadas en occidente hace ya mucho tiempo. Aunque las Naciones Unidas declararon el decenio de los ochenta Década Internacional para el Abastecimiento de Agua Potable y el Saneamiento, y se instituyó un programa para suministrar agua potable sin riesgos y una instalación sanitaria apropiada para todos antes de 1990, queda mucho por hacer para cumplir los ambiciosos objetivos del programa. Si bien se han realizado ya algunos progresos en México, Indonesia y Ghana, entre otros.

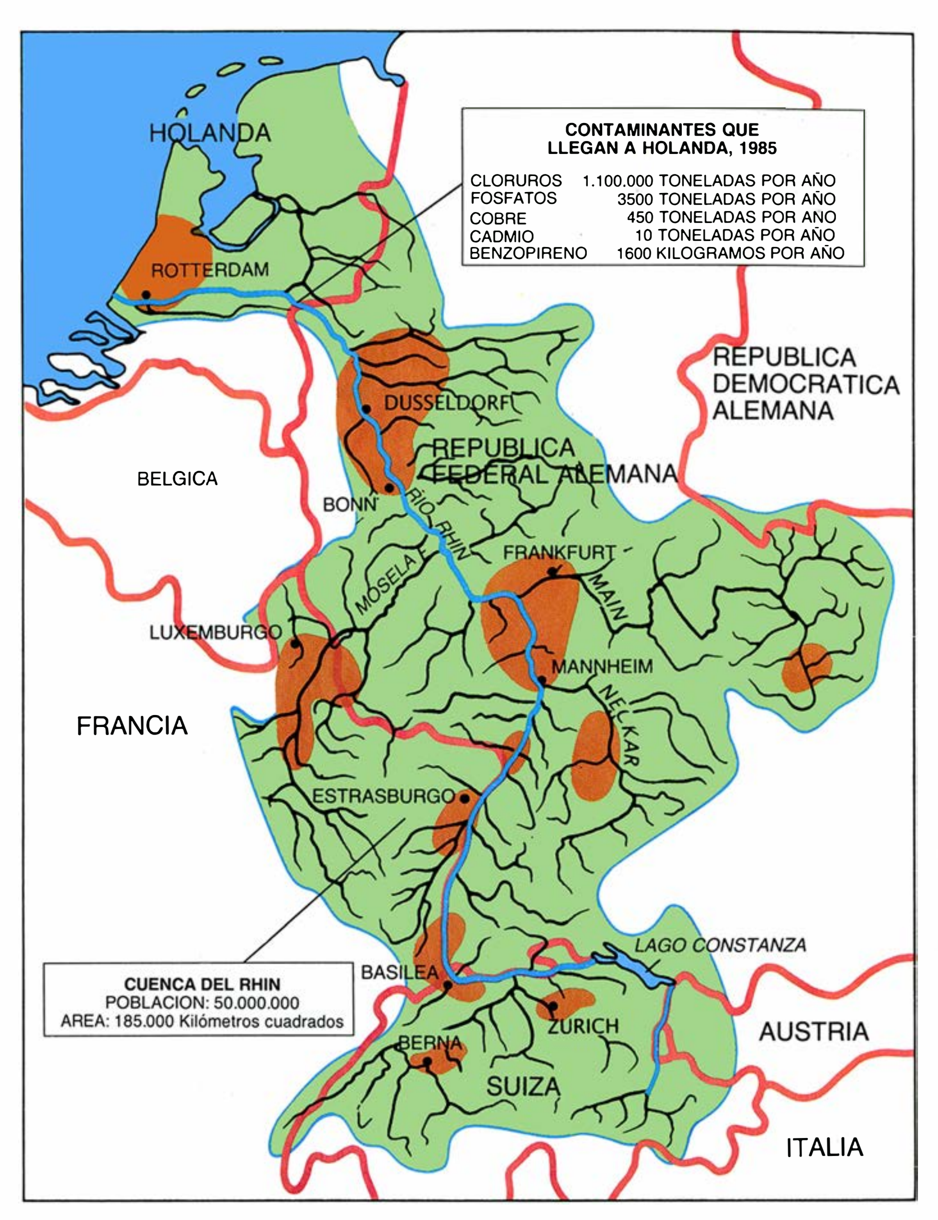
La calidad del agua de los lagos es comparable con la de los ríos. Miles de lagos, incluidos algunos de los de mayor tamaño, se ven sometidos hoy a procesos de acidificación o de eutrofización (fenómeno en virtud del cual las entradas cuantiosas de nutrientes, de fosfatos en particular, instan la proliferación desmesurada de algas). Cuando las algas sobreabundantes mueren, su degradación microbiana consume la mayor parte del oxígeno disuelto en el agua, rebajando notablemente el poder del medio para sostener la vida. En Eu-

6. CONTAMINACION DE LOS OCEANOS, un problema de creciente gravedad, sobre todo en las zonas ribereñas. Las aguas residuales, rica en nutrientes y en materia orgánica consumidora de oxígeno, es un tipo de contaminante que puede amenazar la vida acuática, como ocurre ya en la bahía de San Francisco.

ropa y Norteamérica se ha demostrado la viabilidad de una rehabilitación de los lagos —eso sí, a un precio—, pero el proceso necesita varios años. El aporte de caliza resulta eficaz contra la acidificación; evacuar el exceso de nutrientes y restringir la entrada de nuevos nutrientes ayudan a reducir la eutrofización.

Si la contaminación de ríos y lagos es potencialmente reversible, no lo es en el caso de las aguas subterráneas. Sabemos todavía muy poco sobre la calidad de vastos reservorios subterráneos de la Tierra, excepción hecha de los acuíferos sometidos ya a intensa explotación. En Europa y los Estados Unidos, donde el caudal freático representa una fuente importante de agua dulce, encontramos niveles de nitratos superiores al valor máximo recomendado de 45 miligramos por litro, entre el 5 y el 10 por ciento de todos los pozos analizados. Muchos contaminantes orgánicos acceden a las aguas subterráneas por vías diversas: lixiviación de vertederos de basuras, escapes de redes de alcantarillado y tanques de combustible y escorrentía procedente de zonas agrícolas o de las superficies pavimentadas de las áreas urbanas y suburbanas, cada día más abundantes.

El agua subterránea no está en contacto directo con el oxígeno de la atmósfera; por ello, su capacidad de autopurificación es muy baja: los microbios que normalmente degradan los contaminantes orgánicos necesitan oxígeno para realizar esa labor. La prevención de la contaminación constituye el único método racional para abordar el problema, de manera especial en los países en vías de desarrollo, donde es probable un aumento de la dependencia de las reservas de aguas subterráneas.



7. DRENA EL RIO RHIN una vasta cuenca (*verde*) que comprende cuatro países —Suiza, la República Federal Alemana, Francia y Holanda—, con un recorrido de 1320 kilómetros desde los Alpes hasta el mar del Norte. La cuenca se halla intensamente industrializada (las principales concentraciones urbanas se han representado en marrón); el río va acumulando desechos e introduce en Holanda una importante carga de sustancias contaminantes. Desde 1980 ha disminuido la cuantía de algunos de éstos. Los cuatro países cooperan en un Plan de Acción para el Rhin, que pretende mejorar la calidad de agua del río. Se primará el proceso de reciclaje de las industrias, sustituyendo así el tratamiento "a boca de desagüe".

Los océanos forman parte de las "zonas internacionales" del mundo, explotadas por muchos países. La responsabilidad sobre las mismas no recae en ninguno en particular y por tanto resulta más difícil su salvaguarda. Más de la mitad de la población mundial vive en zonas costeras marítimas, deltas de ríos, a lo largo de estuarios y en desembocaduras fluviales; además, del orden del 90 por ciento de la pesca marítima se realiza en una franja costera de 320 kilómetros. Cada año, unos 13.000 millones de toneladas de sedimentos limosos se depositan en las zonas costeras adyacentes a las desembocaduras de los ríos. Aunque de todos modos la mayor parte de estos sedimentos habrían acabado en el océano, una porción creciente de la sedimentación actual puede atribuirse a la erosión y la deforestación de origen antrópico. Según sean las actividades específicas agrícolas e industriales que se realicen en cada área de drenaje, la zona litoral se verá fertilizada y contaminada por los materiales detríticos y en disolución que reciba.

La zona costera es el lugar donde se producen importantes reacciones físicoquímicas entre los flujos de agua marina y de agua dulce. Se trata, además, de la zona de mayor productividad biológica, alojando un amplio espectro de especies marinas, desde el plancton hasta los peces, las tortugas y las ballenas. La acuicultura en las zonas litorales produce actualmente alrededor del 10 por ciento de la pesca mundial total. Los 240.000 kilómetros cuadrados de manglares costeros existentes constituyen hábitats esenciales para muchas especies piscícolas de interés económico, durante parte de su ciclo vital, y suministran a la vez madera para la construcción y leña. Los carrizales y las marismas son otros ejemplos de ecosistemas de zonas húmedas costeras biológicamente ricos. Sin olvidar que las zonas costeras mantienen una industria turística que proporciona importantes beneficios económicos y al-

berga un número creciente de áreas protegidas, como por ejemplo el Parque Marino del Arrecife de la Gran Barrera, en Australia.

Los caudales de los ríos, la escorrentía difusa, el transporte atmosférico, el vertido o la incineración de residuos en el mar, la minería en la plataforma continental y los accidentes en el transporte marítimo son las principales vías por las que los 20.000 millones de toneladas de materiales disueltos y en suspensión llegan al océano; pero comienzan ejerciendo su efecto en la zona costera.

Los bifenilos policlorados (BPC) y otros productos químicos tóxicos persistentes, como el DDT y compuestos de metales pesados, se encuentran ya extendidos por todos los ecosistemas marinos del planeta, en parte mediante la acumulación gradual a lo largo de la cadena trófica. La prohibición del uso del DDT y los BPC, puesta en vigor desde hace unos 10 años en los países industrializados, ha reducido la concentración de tales productos químicos en las especies marinas de las aguas costeras de Norteamérica y de Europa. Sin embargo, esos productos químicos siguen utilizándose y llegando al mar en muchas regiones tropicales.



8. NUEVAS TECNICAS DE MICROIRRIGACION **para suministrar agua directamente a las raíces de las plantas. Suponen un notable avance en la conservación de los recursos hídricos, ya que proporcionan únicamente la cantidad aproximada de agua que la planta necesita. Vemos aplicado ese sistema en una plantación de algodón de la parte central de Texas, una región árida donde la eficacia de la microirrigación ha posibilitado que los agricultores ahorren en agua subterránea. (Fotografía cedida por Ted Spiegel.)**

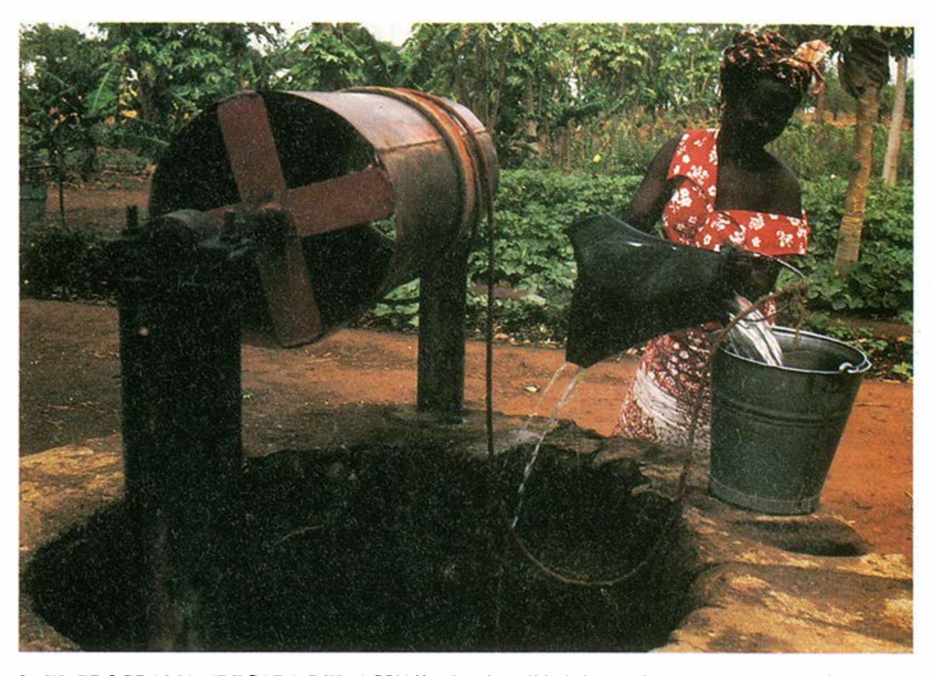
Las corrientes oceánicas sirven también de vehículo para el transporte de desperdicios y contaminantes en general. Tenemos ejemplos familiares en las botellas de plástico no degradables y los envases que estropean las playas y acaban flotando en el océano. Por su culpa mueren miles de aves, peces y mamíferos marinos, al confundirlos con comida o al enredarse con ellos. Menos espectaculares, pero posiblemente más graves, son los procesos químicos y biológicos por medio de los cuales ciertas sustancias tóxicas, como los residuos radiactivos, se distribuyen y acumulan; son procesos muy mal conocidos todavía. La sobrecarga de aguas residuales procedentes de áreas urbanas costeras inducen la eutrofización de las aguas litorales, hasta el extremo de alterar la composición de las poblaciones de plancton. Este, al llegarle abundantes nutrientes con las aguas residuales, experimenta un rápido crecimiento de población, agotando la cantidad de oxígeno disponible en el agua, lo que supone el exterminio de la fauna piscícola. Más aún, la presencia de bacterias patógenas en las aguas residuales ha obligado a cerrar al público muchos kilómetros de playa y ha determinado igualmente prohibiciones en la recolección de moluscos marinos, que concentran las bacterias en sus tejidos.

Aproximadamente, la décima parte del 1 por ciento de la producción mundial anual de petróleo —unos cinco millones de toneladas al año, o sea, más de un gramo por cada 100 metros cuadrados de superficie oceánica— va a parar al mar. Zonas extensas del océano se hallarían cubiertas del petróleo acumulado desde las últimas décadas, si no fuera porque se evapora o acaban las bacterias degradándolo. Aunque el petróleo es biodegradable casi en su totalidad, los microorganismos que lo descomponen necesitan mucho tiempo para realizar su cometido, pues la actividad de éstos viene limitada por las bajas concentraciones en nutrientes del agua del mar. Y hasta llegar ahí, los efectos de los vertidos de petróleo resultan mortales para organismos del plancton, larvas de peces, moluscos, aves y mamíferos marinos.

Es evidente que la calidad del agua de las zonas costeras está gravemente amenazada, con daños importantes para las factorías pesqueras y las especies marinas de vida libre. El Báltico y el Mediterráneo, mares regionales que tienen una mayor longitud de línea de costa por kilómetro cuadrado que los grandes mares, sufren una agresión mayor por contaminación de sus aguas. Su delicada situación muestra lo que podría ocurrir en el futuro con los grandes océanos del mundo.

La actividad humana es sin duda responsable del daño generalizado infligido contra los ecosistemas marinos. Queda por establecer con qué velocidad se acumulan las sustancias tóxicas en los organismos marinos y si tal acumulación es reversible. Faltan datos para determinar con precisión la suerte de transporte de los productos químicos sintéticos a través de los océanos, así como la probabilidad de que las sustancias tóxicas acumuladas en los sedimentos del fondo se introduzcan en la alimentación humana. Sea como fuere, la experiencia nos dicta actuar con la máxima cautela, sobre todo si tenemos en cuenta que la recuperación de los océanos resulta incomparablemente más difícil que la de lagos y mares interiores, por no decir imposible.

La gestión de los recursos hídricos —tanto en lo relativo a cantidad como en cuanto a calidad— se practica hoy, hasta cierto punto, por todo el mundo, pero los resultados, especialmente en lo relativo al control de la calidad, no han sido los adecuados. Todos los síntomas apuntan a un mayor deterioro de la calidad de las aguas dulces y marinas; resulta, pues, apremiante la puesta en marcha de programas de gestión más drásticos.



9. EL PROGRAMA "DECADA DEL AGUA" sobre la calidad de la misma, puesto en marcha por las Naciones Unidas, aspira a proporcionar a la población mundial agua potable segura y un saneamiento apropiado para la década de los noventa. La fotografía (tomada en 1983) muestra una mujer extrayendo agua potable de un nuevo pozo en Mali. A pesar de las buenas intenciones del programa y de la acción de otros organismos, la calidad del agua es un problema acuciante en muchas regiones del mundo.

Muchos de los principios rectores en la gestión del agua se han ido refinando con la experiencia acumulada en el pasado y, aunque se conocen bien, su aplicación práctica se ha retrasado. Urge, sobre todo, abordar el problema de forma integrada. En cada cuenca fluvial o lacustre las aspiraciones socioeconómicas y ambientales deben orquestarse de tal manera que los asentamientos humanos, las industrias, la producción energética, la agricultura, los bosques, las explotaciones pesqueras y la vida silvestre puedan coexistir. En muchos casos, los intereses, plurales, no deben entrar forzosamente en conflicto, pudiendo ser complementarios. El control de la erosión, por ejemplo, va estrechamente ligado a la repoblación forestal, la prevención de las inundaciones y la conservación del agua.

La visión integrada exige una estrecha cooperación gubernamental e intergubernamental; y se opone a la fragmentación de las funciones que, desde siempre, se reparten los diferentes organismos de la administración. En muchos países, el abastecimiento de agua y el saneamiento dependen de departamentos distintos. Los presupuestos departamentales están compartimentados por exclusivos criterios económicos, haciéndose difícil equilibrar las inversiones realizadas por un departamento con las ganancias o ahorros que puedan reportar a otro.

Tales obstáculos adquieren proporciones gigantescas en el ámbito internacional. No es probable, por ejemplo, que un país invierta bastante en la descontaminación del agua de un río de la que se beneficien otros países del curso inferior. Hoy, los países en vías de desarrollo se hallan en mejor situación que los países desarrollados para avanzar en esa dirección, dado que, en los segundos, los intereses creados se han atrincherado en rígidas estructuras administrativas. En ese orden el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (PANU) ha diseñado un plan de acción para el río Zambezi que se guía por los principios de la gestión integrada.

Los proyectos de gestión hídrica deberían propiciar un consumo eficaz del agua más que a un mayor suministro. El aumento del suministro suele ser la solución más costosa y, en cualquier caso, lo único que hace es retrasar una crisis inevitable. Y puesto que muchos países están acabando con sus reservas de agua, no queda, en determinadas situaciones, otra vía que mejorar la eficacia del consumo. Las prácticas de regadío seguidas por la mayoría de los países son derrochadoras. En promedio, sólo alrededor del 37 por ciento de toda el agua de regadío mundial se emplea en las cosechas agrícolas; el resto no llega nunca a ser absorbido por las plantas y puede considerarse perdido. Las nuevas técnicas de microirrigación, por medio de tuberías perforadas que suministran directamente el agua a las plantas, proporcionan una salida inmejorable para la conservación del agua, al tiempo que permiten extender las tierras de regadío sin tener que construir nuevos embalses.

La explotación de las aguas subterráneas para incrementar el suministro debería evitarse, a toda costa, a menos que se tengan garantías de que el acuífero se recargará de nuevo. La protección de la calidad de las aguas subterráneas merece también una especial atención. Las autoridades gubernamentales tienden a tomar medidas de control de la contaminación cuando ésta se delata con signos manifiestos, verbigracia, la basura arrojada a la pla-

ya. El agua subterránea, oculta a la vista, puede ir gradualmente contaminándose sin provocar una protesta del público hasta que ya es demasiado tarde para paliar y remediar los daños producidos por la contaminación.

Se ha hecho patente que las medidas de prevención de la contaminación y rehabilitación de las masas de agua que ya están contaminadas deberían ir por delante del desarrollo de técnicas de purificación. Estas últimas se están complicando y encareciendo cada vez más por culpa del creciente número de contaminantes del agua; el dinero gastado en eliminar los contaminantes del agua potable se hallaría mejor invertido en prevenir la entrada de dichos contaminantes en el agua. El alto coste de la rehabilitación de las masas de agua contaminadas es otro factor que refuerza el atractivo de los programas de prevención de la contaminación.

Por esta razón, los remedios de "boca de desagüe" contra la contaminación por aguas industriales deberían sustituirse por el reciclaje y la reutilización del agua. Con frecuencia, las nuevas fábricas que luchan contra la contaminación del agua limitando los residuos resultan más económicas que las que construyen sus propias instalaciones de depuración para cumplir las normas ambientales. Probablemente, las fábricas que incorporen técnicas de control de la contaminación serán mejor aceptadas por una población sensible a esas cuestiones. Como dijo Peter Donath, de Ciba Geigy, una de las mayores empresas químicas del mundo, en la última Conferencia Internacional del Rhin, "sólo con productos y procesos de fabricación que cumplan los requisitos ambientales la industria química logrará la aceptación social en el futuro". A modo de ejemplo de esta nueva tendencia en ingeniería química, citó un nuevo proceso para la producción de ácidos sulfónicos de naftaleno que reduce la contaminación en más del 90 por ciento.

La contaminación de un río o un mar regional se percibe antes, obviamente, que la contaminación de los océanos, por ser éstos mucho mayores. De ahí que el PANU haya establecido ya programas de control de la contaminación para diez mares regionales. Aunque constituyen un buen comienzo, deberían completarse con la protección de los océanos. Un paso reciente en esta dirección se ha dado con el acuerdo internacional sobre prohibición de arrojar plásticos al mar desde los barcos, con vigencia desde comienzos de 1989. Otras normativas internacionales, que regulan los recursos marinos, necesitan perfeccionarse mediante mejores esquemas de control y medidas de consolidación.

Paralela a la exigencia de una mejor gestión de los recursos hídricos corre la necesidad de ahondar más en la investigación de la hidrosfera. Se requiere un mayor conocimiento de la ecología y toxicología de la vida marina para mejorar la explotación de los océanos, así como una descripción más cabal de los efectos ecológicos ejercidos por los contaminantes de larga duración sobre las aguas oceánicas.

Ignoramos bastante de muchos aspectos del ciclo hidrológico; entre ellos, los flujos entre sus compartimentos y el alcance de las reservas de aguas subterráneas. De estos y de otros problemas se ocupa el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO. Por su parte, el PANU, la Organización Mundial de la Salud y la organización no gubernamental del Consejo Internacional de Uniones Científicas acaban de incoar los principales programas internacionales de investigación sobre las interacciones entre el clima y el ciclo hidrológico.

Es demasiado fácil predecir qué ocurrirá si no se aplican los principios consolidados de la gestión hídrica. Hemos visto ríos y lagos transformados ya en verdaderas cloacas y pozos negros, personas morir por beber agua contaminada, playas infectadas, peces envenenados por metales pesados y hábitats destruidos. Una conducta del "laissez-faire", en cuanto a la gestión del agua se refiere, significará arrastrar el problema y agrandarlo a una mayor escala. Sólo cabe esperar que el reconocimiento de este hecho incite a los gobiernos y a los individuos a la acción.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIE ÖKOLOGISCHEN MILLIARDEN. Lutz Wicke. Kösel Verlag, 1986.

RESOURCES AND WORLD DEVELOPMENT. Dirigido por Digby J. McLaren y Brian J. Skinner. John Wiley & Sons. 1987.

WORLD RESOURCES 1987: AN ASSESSMENT OF THE RESOURCE BASE THAT SUPPORTS THE GLOBAL ECONOMY. World Resources Institute/International Institute for Environment and Development. Basic Books, 1987.

WORLD RESOURCES 1988-89: AN ASSESSMENT OF THE RESOURCE BASE THAT SUPPORTS THE GLOBAL ECONOMY. World Resources Institute/International Institute for Environment and Development. Basic Books, 1988.

La biodiversidad, amenazada

La destrucción de los hábitats, principalmente en los trópicos, está provocando, cada año, la extinción de miles de especies. Las consecuencias serán terribles, a menos que se invierta la tendencia

Edward O. Wilson

La especie humana apareció en el momento de mayor diversidad biológica que ha conocido la historia de la Tierra. Hoy en día, a medida que las poblaciones humanas se expanden y alteran el ambiente natural, están reduciendo la diversidad biológica a su nivel más bajo desde final de la era Mesozoica, hace 65 millones de años. Aunque imposibles de calcular, las consecuencias últimas de esta colisión biológica serán, sin la menor duda, perniciosas. En eso consiste, en esencia, la crisis de la biodiversidad.

En cierto modo, la pérdida de diversidad constituye el proceso principal de cambio ambiental. Y lo afirmo porque se trata del único proceso que es completamente irreversible. Sus consecuencias son, asimismo, las menos predecibles, porque el valor de la biota terrestre (es decir, la fauna y la flora consideradas conjuntamente) sigue en gran medida sin estudiar y sin apreciar. Puede decirse que cada país tiene tres tipos de riquezas: material, cultural y biológica. Los dos primeros tipos los comprendemos perfectamente, pues son el nervio de nuestra vida cotidiana. La riqueza biológica se toma mucho menos en serio, lo que constituye un grave error estratégico, error que lamentaremos cada vez más con el transcurso del tiempo. Por un lado, la biota forma parte de la herencia de un país, fruto de millones de años de evolución en dicha zona y, por ello, motivo de preocupación nacional como lo son las peculiaridades de su lengua y de su cultura. Por otro lado, es una fuente potencial de inmensas riquezas materiales sin explotar, en forma de alimento, medicinas y otras sustancias de interés comercial.

EDWARD O. WILSON fue uno de los primeros en llamar la atención acerca de la pérdida global de diversidad biológica y en alertar sobre las consecuencias de su caída. Su interés por los seres vivos, en especial por las hormigas, se remonta a su niñez, de cuando datan sus primeras exploraciones y recolecciones de organismos. Inició su formación académica en biología evolutiva en la Universidad de Alabama. Se doctoró por la de Harvard, donde ahora es profesor Frank B. Baird, Jr. de ciencias y conservador de entomología. Wilson ha aportado contribuciones importantes en varios campos: comportamiento y evolución de los insectos sociales, comunicación química y evolución del comportamiento social. Ha recibido la Medalla Nacional de la Ciencia, el premio Pulitzer de ensayo por su libro *Sobre la naturaleza humana* y el premio Tyler por sus logros en ciencia ambiental.

Resulta singular, habida cuenta de la interdependencia entre los humanos y las demás especies que habitan el planeta, que el estudio de la biodiversidad se halle todavía en mantillas. A pesar de que la sistemática es una de las dos disciplinas formales más antiguas de la biología (la otra es la anatomía), ni siquiera sabemos el orden de magnitud del número de especies de organismos que hay en la Tierra. Con la ayuda de otros especialistas he estimado que el número de especies que han sido formalmente descritas (es decir, que han recibido un nombre científico latinizado) se cifra aproximadamente en 1,4 millones. Hasta las conjeturas más cautas sitúan el número actual de especies en cuatro millones o más, lo que supone doblar de lejos las descritas hasta la fecha.

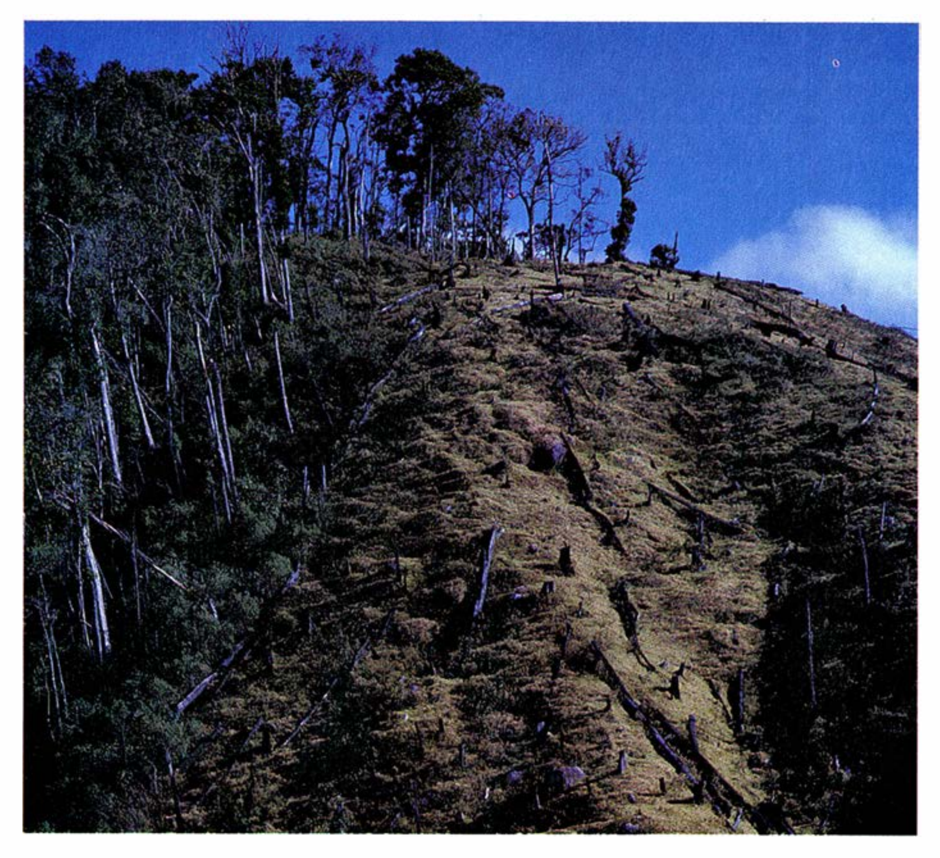
Terry L. Erwin, del Museo Nacional de Historia Natural de la Institución Smithsoniana, cree que el número de especies es incluso mayor. Con ayuda de sus colaboradores, aplicó una niebla insecticida a la bóveda arbórea de la pluviselva en diversos puntos de Brasil y Perú, para así calcular el número total de especies de insectos y de otros artrópodos en este hábitat rico, aunque todavía relativamente inexplorado. Extrapolando sus hallazgos a las selvas tropicales húmedas de todo el mundo, e incluyendo una estima aproximada del número de especies terrícolas en sus cálculos, Erwin llegó a un total global de 30 millones de especies. Aun cuando ese guarismo pecara por exceso, es seguro que la cuantía mundial de biodiversidad subirá drásticamente atendiendo a otras vías compensatorias.

Me explicaré con algunos ejemplos. Acaros y hongos son grupos tan sumamente ricos cuan poco explorados. Se admite que los fondos de los grandes abismos oceánicos albergan cientos de miles de especies, muchas de las cuales siguen sin describirse. El mismo número de especies bacterianas de la Tierra, se cree, multiplica varias veces las 3000 hasta ahora caracterizadas; en ese contexto, se acaba de descubrir una flora bacteriana enteramente nueva, que vive escondida a 350 metros o más en el interior del suelo cerca de Hilton Head, Carolina del Sur. E incluso continúan apareciendo nuevas especies de aves, a un ritmo medio de dos por año.

Los expertos en sistemática están de acuerdo en que, cualesquiera que sean las cifras absolutas, más de la mitad de todas las especies de la Tierra viven en las selvas tropicales húmedas, popularmente conocidas como pluviselvas. Estos ecosistemas ocupan sólo el 6 por ciento de la superficie terrestre y se hallan en las zonas cálidas donde la pluviosidad es de 200 centímetros anuales o más, lo que propicia el desarrollo de árboles perennes de hoja ancha. Los árboles suelen disponerse en tres o más capas horizontales, elevándose la bó-

1. PLUVISELVA TROPICAL del norte de Costa Rica. Las pluviselvas constituyen uno de los hábitats más ricos en especies sobre la Tierra. La enorme diversidad biológica que se encuentra en esos parajes se explica por la concentración allí reinante de los grupos más ricos en especies del planeta, los invertebrados y las plantas fanerógamas. La vegetación, constituida en gran parte por plantas perennes de hojas anchas, se muestra exuberante; los árboles más altos se elevan hasta los treinta metros por encima del suelo de la pluviselva.







2. LA DEFORESTACION AVANZA a un ritmo rápido en todo el mundo. En Costa Rica (*arriba*), así como en zonas de Sudamérica, se tala la pluviselva y las tierras son valladas y convertidas en pastos. A diferencia de los bosques templados, en los que los nutrientes se acumulan en el suelo, los bosques tropicales se caracterizan por su suelo de baja calidad. En consecuencia, a los dos o tres años de la deforestación el suelo que antes mantenía una vegetación densa resulta ahora demasiado pobre en nutrientes para proporcionar el pasto suficiente para el ganado. En los Estados Unidos (*abajo*), el impacto de las operaciones de tala a gran escala puede apreciarse claramente en esta fotografía. Los troncos esparcidos en primer plano son de árboles, talados y despojados de sus ramas, que esperan su transporte.

veda arbórea de los más altos a 30 metros o más del suelo. Las copas de los árboles de las distintas capas dejan pasar poca luz solar al suelo de la selva, lo que inhibe el crecimiento del sotobosque y crea grandes espacios libres, por donde es relativamente fácil andar.

El convencimiento de que la mayoría de las especies del planeta vive en las pluviselvas tropicales no se apoya en un censo exacto y amplio, sino en la concentración allí existente de dos grupos abrumadoramente ricos en especies: los artrópodos (en especial los insectos) y las plantas fanerógamas. Hay otros ambientes que acumulan una copiosa riqueza en especies: arrecifes coralinos, llanuras abisales de los océanos y matorrales de Sudáfrica y de Australia sudoccidental; parece, sin embargo, que las pluviselvas les superan con ventaja.

Los biólogos tropicales cuentan anécdotas sobre la prodigiosa variedad en este tipo de hábitat único. En una sola leguminosa arbórea del Perú recolecté una vez 43 especies de hormigas pertenecientes a 26 géneros, aproximadamente la misma diversidad de hormigas que hay en todas las Islas Británicas. En 10 parcelas seleccionadas de una hectárea, en Kalimantan, Indonesia, Peter S. Ashton, de la Universidad de Harvard, encontró más de 700 especies de árboles, aproximadamente la misma cifra de árboles endémicos de toda Norteamérica. El récord mundial en el momento de escribir este artículo (y que sin duda alguna será batido) lo estableció en 1988 Alwyn H. Gentry, del Jardín Botánico de Missouri, que identificó unas 300 especies de árboles en cada una de dos parcelas de una hectárea cerca de Iquitos, Perú.

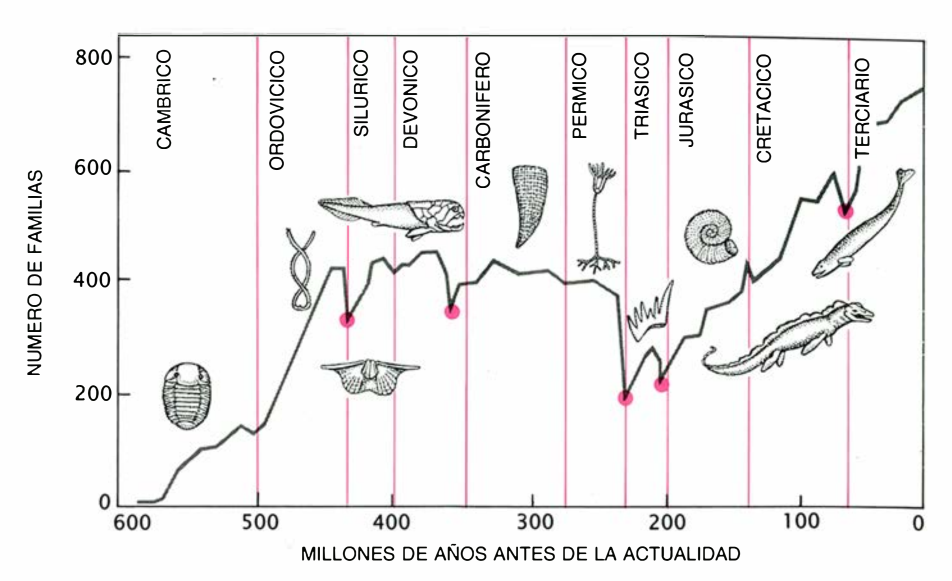
¿Por qué razón se ha multiplicado la vida con tamaña exuberancia en ciertos lugares, muy pocos, como las selvas tropicales y los arrecifes de coral? No hace mucho se suponía que, cuando coexistía un gran número de especies, sus ciclos biológicos y sus redes tróficas se entrelazaban de manera que el ecosistema adquiriese mayor robustez. Esa hipótesis de diversidad-estabilidad ha dejado paso, a lo largo de los últimos 20 años, a un escenario invertido de causa-efecto, que podría denominarse hipótesis de estabilidad-diversidad: las frágiles superestructuras de especies se generan cuando el ambiente permanece lo suficientemente estable para permitir su evolución durante dilatados períodos de tiempo. Los biólogos saben hoy que las biotas, como los castillos de naipes, pueden desmoronarse

en respuesta a perturbaciones más o menos pequeñas del ambiente físico.

La historia de la diversidad global queda reflejada en la diversidad que presentan en un momento dado los animales marinos, el grupo mejor representado en el registro fósil. La trayectoria puede resumirse como sigue: después del florecimiento "experimental" inicial de los animales multicelulares se produjo un rápido aumento en el número de especies en el Paleozoico temprano (hace unos 600 millones de años), y vino después un estancamiento en meseta durante los restantes 200 millones de años de la era Paleozoica; se asistió, por último, a un aumento lento, aunque constante, a lo largo del Mesozoico y del Cenozoico, hasta el máximo actual de diversidad, que supera a todos los anteriores.

La impresión general que se saca al examinar estos datos y otros comparables, relativos a grupos diferentes de organismos, es que la diversidad biológica, difícil de conseguir, tardó mucho en llegar. Además, la procesión de la vida sufrió un parón ante cinco episodios de extinciones masivas durante los períodos Ordovícico, Devónico, Pérmico, Triásico y Cretácico. El último de los citados es, con mucho, el más famoso, porque dio al traste con la edad de los dinosaurios, cedió la hegemonía a los mamíferos y finalmente, para bien o para mal, hizo posible el origen de nuestra propia especie. Pero la crisis del Cretácico fue de segundo rango, si la comparamos con el gran desastre del Pérmico, hace unos 240 millones de años, que causó la extinción de un 77 a un 96 por ciento de todas las especies animales marinas. En palabras de David M. Raup, de la Universidad de Chicago: "Si estas estimaciones son mínimamente exactas, la biología global (al menos en lo que se refiere a los organismos superiores) estuvo en un tris de desaparecer". Se necesitaron cinco millones de años, ya bien entrado el Mesozoico, para que la diversidad de especies empezara a recuperarse.

¿Qué lecciones extraer de estos episodios de extinción del pasado? Es evidente que la recuperación, con tiempo suficiente, es a veces posible. También es cierto que en algunos casos pueden desarrollarse rápidamente nuevas especies. Una minoría notable de plantas fanerógamas se originó en una sola generación por poliploidía, es decir, la multiplicación de la dotación cromosómica, ya sea en un mismo individuo o después de la hibridación de dos especies que antes eran distintas. La misma especiación geográfica, en la que las poblaciones divergen genéticamente después de haber estado separadas por la barrera que supone un estrecho o un desierto, puede en casos extremos conducir a la evolución de nuevas especies en sólo 10 o 100 generaciones. Por ello puede argumentarse que, cuando ocurre una extinción en masa, el déficit puede cubrirse en un tiempo bastante corto. Pero en tales circunstancias el simple *número* de especies significa muy poco. Lo que importa más, visto desde la expansión de los códigos genéticos y de los múltiples tipos de vida que éstos prescriben, es la diversidad de los niveles taxonómicos superiores: el número de géneros, de familias, etcétera.

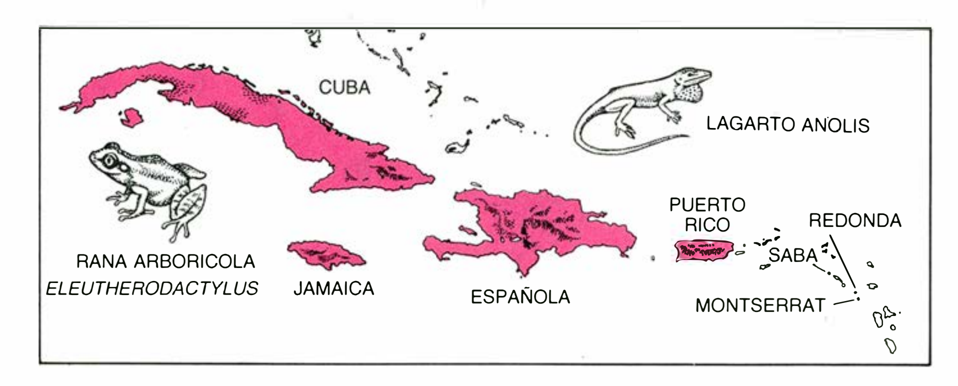


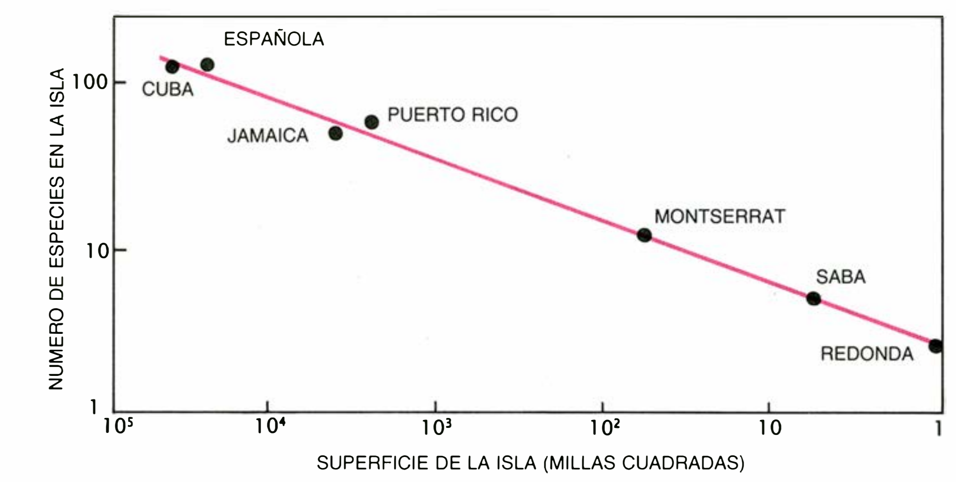
3. LENTO PROGRESO DE LA DIVERSIDAD BIOLOGICA a lo largo del tiempo y retrocesos ocasionales provocados por las extinciones en masa. Se conocen cinco episodios de extinción generalizada, coincidentes con las fases terminales de los períodos Ordovícico, Devónico, Pérmico, Triásico y Cretácico, hitos en los que el número de familias de organismos marinos se redujo en un 12, 14, 52, 12 y 11 por ciento, respectivamente. La extinción de las postrimerías del Pérmico fue, con mucho, la más drástica. Desde entonces, la diversidad ha aumentado lentamente hasta su máximo actual, el mayor de todos los tiempos; sin embargo, y como resultado de la actividad humana, está decayendo a un ritmo sin precedentes.

Una especie adquiere su interés máximo cuando reúne unas características exclusivas que garantizan su clasificación en un género distinto o incluso en un taxón de nivel superior, una nueva familia, por ejemplo. Un ejemplo nos ayudará a ilustrar esta idea. En China occidental se descubrió recientemente una nueva especie de muntiaco; al parecer, difiere del muntiaco asiático típico sólo por el número de cromosomas y algunos rasgos anatómicos secundarios. El hombre valora intuitivamente esta especie ligeramente diferente, desde luego, pero no tanto como valora al panda gigante, tan peculiar en sus rasgos que ha forzado la creación de un género (*Ailuropoda*) y una familia (*Ailuropódidos*) propios.

En los últimos 10.000 años la diversidad biológica ha entrado en una era completamente nueva de la turbulenta historia de la vida sobre la Tierra. La actividad humana ha tenido un efecto devastador sobre la diversidad de las especies, y la tasa de extinciones inducidas por el hombre se está acelerando. La presión más fuerte se ha ejercido hasta ahora sobre las islas, lagos y otros ambientes aislados y netamente delimitados. La mitad de las especies de aves de la Polinesia han sido eliminadas por la caza y la destrucción de los bosques autóctonos. En la década de 1800, la mayor parte de la flora única de árboles y arbustos de Santa Elena, una minúscula isla del Atlántico sur, se perdió para siempre cuando la isla fue completamente deforestada. Cientos de especies de peces que son endémicas del lago Victoria, antaño de gran valor comercial como peces de alimento y de acuario, están ahora amenazadas de extinción tras la introducción negligente de una especie de pez, la perca del Nilo. La lista de desastres biogeográficos de este tipo es larga.

Por graves que sean los episodios locales de destrucción como los señalados resultan insignificantes en comparación con la hecatombe de especies producida por la tala e incendio de las pluviselvas tropicales. La selva se ha reducido ya a aproximadamente el 55 por ciento de su extensión original (según se ha inferido de los perfiles de suelo y de clima de la superficie terres-





4. NUMERO DE ESPECIES que habitan una isla y relación con su tamaño. Por regla general, cuando la superficie de una isla se decuplica, su número de especies se duplica. Esa razón se comprueba fácilmente en el archipiélago de las Antillas (*arriba*), por ejemplo, donde hay numerosas islas de tamaños diferentes. Se contó el número de especies de reptiles y anfibios, entre ellas los lagartos del género *Anolis* y las ranas arborícolas del género *Eleutherodactylus*, de cinco islas, y el total combinado se puso en relación con la superficie de cada isla. Como el gráfico indica (*abajo*), una isla grande, así Cuba, tiene más del doble de especies que una isla mucho menor, la de Saba, por ejemplo. Estos hallazgos encierran implicaciones importantes para la biología de la conservación, porque permiten predecir cuál será la pérdida de especies debida a la destrucción de su hábitat y determinar el tamaño óptimo de las reservas.

tre), y sigue menguando a un ritmo que supera los 100.000 kilómetros cuadrados por año. Esta cifra supone un 1 por ciento de su extensión total, más que la superficie de Suiza y Holanda juntas.

¿Qué comporta esa restricción del hábitat en la diversidad específica? En sistemas de archipiélagos, pensemos en los de las Antillas y la Polinesia, el número de especies que se encuentra en una isla guarda una relación bastante aproximada con la superficie de la isla; el número de especies suele aumentar con la superficie insular, en una proporción que se halla entre la raíz cúbica y la raíz quinta de la extensión. Muchas islas se encuentran cerca del valor medio de la raíz cuarta del área. La misma relación se mantiene para hábitats "insulares", tales como manchas de bosque rodeadas por un mar de pradera. Una regla aproximada indica que decuplicar la superficie significa duplicar el número de especies. Dicho de otra manera, si la superficie de la isla se reduce diez veces, el número de especies quedará en la mitad.

La teoría de la biogeografía insular, que se ha basado, al menos a grandes rasgos, en la alteración artificial de biotas insulares y en otros estudios de campo, sostiene que el número de especies suele fluctuar alrededor de un valor de equilibrio. El número se mantiene más o menos constante a lo largo del tiempo porque la tasa de inmigración de nuevas especies a la isla compensa la tasa de extinción de las especies que ya están allí, de modo que la diversidad permanece bastante constante. La relación entre la teoría de la biogeografía insular y la diversidad global es importante: si la superficie de un determinado hábitat, como un retazo de pluviselva, se reduce en determinada proporción, el número de especies que allí viven descenderá hasta un equilibrio nuevo, más bajo. La rica selva que se extiende a lo largo de la costa atlántica del Brasil, por ejemplo, ha sido deforestada hasta reducirla a menos del 1 por ciento de su extensión original; incluso en el caso improbable de que no se cortaran más árboles, cabría esperar que la biota forestal cayera en quizás un 75 por ciento, es decir, hasta la cuarta parte del número original de especies.

He estimado a la baja que, a escala mundial, la pérdida final atribuible únicamente a la deforestación de la pluviselva (manteniendo la tasa actual del 1 por ciento) es del orden del 0,2 al 0,3 por ciento de todas las especies de las selvas por año. Si se toma una cifra muy prudente de dos millones de especies confinadas en las selvas, la pérdida global que resulta de la deforestación podría ser del orden de 4000 a 6000 especies por año. Ritmo que es del orden de 10.000 veces superior a la tasa natural de extinción de base que existía antes de la aparición del hombre.

Aunque la destrucción de hábitats se deja sentir de manera aparatosa en las pluviselvas tropicales, de alta diversidad específica, su efecto llega también a otras regiones del planeta, en particular allí donde se talan bosques sin tasa. Sólo en los Estados Unidos se cortan cada año 25.000 hectáreas de bosque maduro, con el propósito principal de exportar la madera al Japón y a otros países ribereños del Pacífico. Los más gravemente afectados son los bosques nacionales del Pacífico noroccidental, de los que en 1987 se obtuvieron 1700 millones de metros cúbicos en tablones, y el Bosque Nacional Tongass, de Alaska; en este último se ha talado, desde 1950, el 50 por ciento de las zonas más productivas. Aunque en estas regiones es posible la reforestación, el proceso de regeneración puede durar 100 años o más.

¿Cuánto tiempo tardan las especies de un hábitat que ha visto mermados sus límites, o ha quedado destruido, en extinguirse? La tasa de extinción depende de la cuantía del fragmento de hábitat que ha permanecido indemne y del grupo de organismos afectados. En un estudio ingenioso, Jared M. Diamond, de la Universidad de California en Los Angeles, y John W. Terborgh, de la Universidad de Duke, contaron el número de especies de aves en varias islas de plataforma continental, que hasta hace unos 10.000 años habían formado parte del continente y quedaron después aisladas del mismo cuando subió el nivel del mar. Comparando el número de especies por isla con el número de especies en el continente adyacente, Diamond y Terborgh dedujeron el número de especies que cada isla había perdido y correlacio-

naron la tasa de pérdida de especies con el tamaño de las islas.

Su modelo ha recibido una confirmación razonable con los estudios empíricos de avifaunas locales; los resultados pintan un cuadro discreto: en retículos de uno a 20 kilómetros cuadrados, extensión habitual de reservas y parques en los trópicos y en otras zonas, el 20 por ciento o más de las especies desaparecen en los primeros 50 años. Algunas veces se extinguen rápidamente. Otras sobreviven cierto tiempo, como "muertos vivientes". En regiones cuyo hábitat natural está muy fragmentado, la tasa de pérdida de especies es aún mayor.

Probablemente, estas tasas de extinción pecan por defecto, porque parten de la hipótesis de que las especies se distribuyen más o menos homogéneamente por todos los bosques sometidos a tala. La observación biológica indica, por contra, que un gran número de especies se concentran en zonas muy limitadas; si se destruye el dominio restringido del hábitat forestal ocupado por una especie, ésta desaparece de inmediato. Tras la reciente deforestación, en Perú, de un solo pico de la cordillera, se perdieron para siempre más de 90 especies vegetales endémicas.

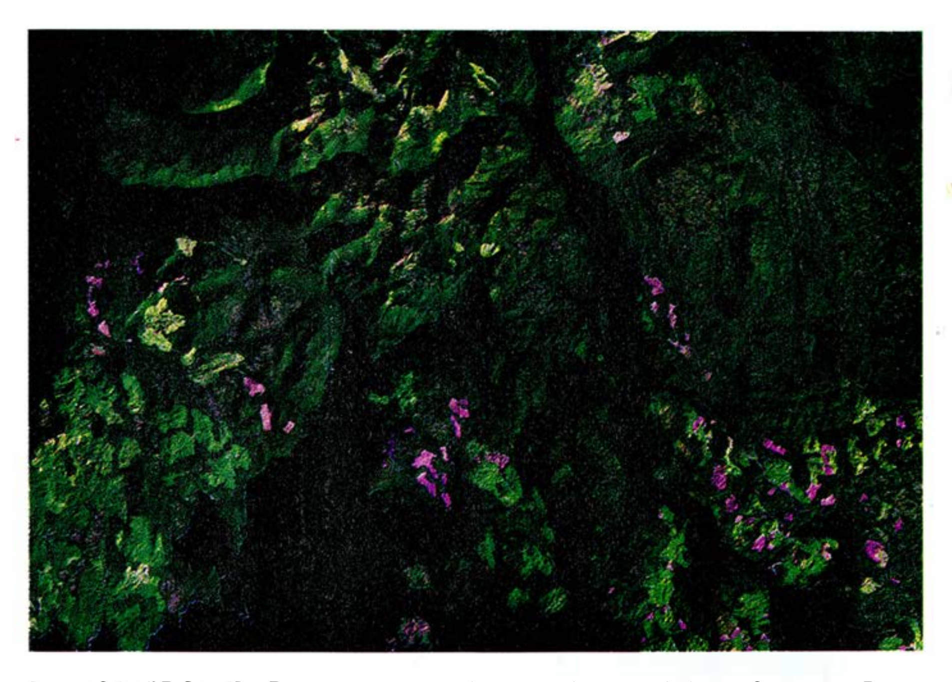
Los ecólogos han empezado a acotar "puntos calientes" en todo el mundo: hábitats que son ricos en especies y que a la vez se hallan en peligro de destrucción inminente. Norman Myers, un consultor ambiental con amplia experiencia en los trópicos, ha compilado una lista de hábitats de pluviselva amenazados de 10 zonas: el Chocó de Colombia occidental, las tierras altas de la Amazonía occidental, la costa atlántica del Brasil, Madagascar, el Himalaya oriental, Filipinas, Malaysia, Borneo noroccidental, Queensland y Nueva Caledonia. Otros biólogos han clasificado de forma similar algunos retazos de bosques templados, matorrales, arrecifes de coral, cuencas hidrográficas y lagos antiguos. Entre los ejemplos más sorprendentes se cita el del lago Baikal, en Siberia, donde gran número de crustáceos y de otros invertebrados endémicos se ven amenazados por los niveles crecientes de contaminación.

La biota mundial está atrapada como si se hallara bajo un gigantesco tornillo de banco. Por un lado, merma de forma acelerada por culpa de la deforestación. Por el otro, se ve amenazada por el caldeamiento climático provocado por el efecto invernadero. Mientras que la pérdida de hábitats es más destructora para las biotas tropicales, se cree que el caldeamiento climático tendrá un impacto mayor sobre las biotas de las regiones templadas frías y polares. Un cambio de clima en la dirección de los polos a un ritmo de 100 kilómetros o más por siglo, que se considera incluso posible, arrasaría reservas naturales y áreas de distribución de especies enteras; muchas clases de plantas y animales no podrían migrar con la rapidez suficiente para persistir.

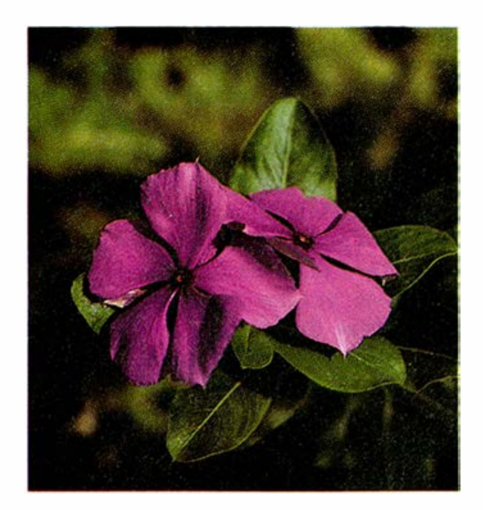
El problema revestiría gravísimo peligro para las plantas, que son relativamente inmóviles y no se dispersan tan fácilmente como los animales. El abeto de Engelmann, por ejemplo, tiene una capacidad de dispersión natural estimada en uno a 20 kilómetros por siglo, de modo que serían necesarias replantaciones masivas para mantener el rango de expansión que ocupa en la actualidad. Margaret Davis y Catherine Zabinski, de la Universidad de Minnesota, predicen que, en respuesta al caldeamiento global, cuatro árboles norteamericanos (el abedul amarillo, el arce de azúcar, el haya y la tsuga del Canadá) se verán desplazados de 500 a 1000 kilómetros en dirección norte. Es probable que cientos de miles de especies sufran un desplazamiento similar; se desconoce cuántas especies que no migren se adaptarán al cambio de clima y cuántas se extinguirán.

La inmensa mayoría de los ecólogos, y me incluyo entre ellos, consideran que cada episodio de extinción de una especie debilita a la humanidad. Cada microorganismo, animal y planta contiene del orden de un millón a diez mil millones de bits de información en su código genético, forjado a través de un número astronómico de mutaciones y episodios de selección natural a lo largo de miles o millones de años de evolución. Tal vez los biólogos lleguen a leer, algún día, los códigos genéticos enteros de ciertas estirpes de algunas de las especies que desaparecen, pero dudo que logren medir, por no hablar de sustituir, las especies naturales y la rica colección de estirpes genéticas que las componen. La presión evolutiva mediante selección natural puede ser demasiado intensa para concebirlo, y no digamos para duplicarlo. Sin diversidad no hay selección (ni natural ni artificial) de organismos adaptados a un determinado hábitat que después experimenta cambios. La diversidad de especies, el acervo génico de que el mundo dispone, es uno de los recursos principales, e insustituibles, del planeta. No tengo conocimiento de ninguna estirpe genética seleccionada artificialmente que haya jamás ganado en su lid con variantes silvestres de la misma especie en el ambiente natural.

Sería pecar de ingenuos pensar que la humanidad sólo tiene que esperar mientras la selección natural vuelve a llenar los vacíos de la diversidad creados por las extinciones en masa. Des-



5. IMAGEN DE SATELITE de la punta septentrional de la isla del Príncipe de Gales, en el Bosque Nacional de Tongass, Alaska; muestra la extensión de la deforestación en esta región. Las áreas de tala reciente y desprovistas de cubierta vegetal aparecen en rosa; las que han sido taladas pero han empezado a recuperarse son de color verde claro; las áreas en las que el bosque no ha sufrido alteración se destacan en color verde oscuro. La fotografía cubre unos 1000 km^2. (Cortesía de Earth Observation Satellite.)




6. PLANTAS DE LAS PLUVISELVAS TROPICALES, algunas de las cuales son fuente de alimentos, medicamentos y otros productos de interés comercial. La pervinca rosa, *Catharanthus roseus* (*izquierda*), contiene sustancias que son eficaces contra algunos cánceres; la palmera babasú, *Orbignya phalerata* (*derecha*), produce racimos de frutos (cada uno de los cuales pesa unos 80 kilogramos), de los que se puede extraer aceite (para cocinar y otros fines). (Michael J. Balick y Jardín Botánico de Nueva York.)

pués de la gran extinción del Cretácico (el último de tales episodios) pasaron de cinco a 10 millones de años antes de que la diversidad tornara a sus niveles originales. A medida que las especies desaparecen, debido en buena parte a la destrucción de sus hábitats, la capacidad de regeneración genética natural se ve muy mermada. En palabras de Norman Myers, estamos causando la muerte del nacimiento.

Las especies silvestres de las selvas tropicales y de otros hábitats naturales se cuentan entre los principales recursos de que dispone el hombre; hasta ahora son los menos utilizados. Hoy en día, menos de la décima parte del 1 por ciento de las especies naturales son explotadas por el hombre, mientras que el resto permanece sin probar y en barbecho. A lo largo de la historia, el hombre ha utilizado, para su alimento, unas 7000 especies vegetales; en la actualidad se conforma con una veintena: trigo, centeno, mijo y arroz, entre otras, plantas que en su mayor parte encontró el hombre del Neolítico accidentalmente en los albores de la agricultura. Pero existen al menos 75.000 especies de plantas que ofrecen partes comestibles; algunas de ellas son manifiestamente superiores a las especies cultivadas. Por ejemplo, la judía alada, *Psophocarpus tetragonolobus*, que crece en Nueva Guinea, ha sido calificada de supermercado monoespecífico: la planta entera (raíces, semillas, hojas, tallos y flores) es comestible, y de su jugo puede prepararse una bebida parecida al café. Crece rápidamente, alcanzando una altura de 4,5 metros en pocas semanas, y tiene un valor nutritivo igual al de la soja.

Las especies silvestres, vegetales y animales, encierran enormes reservas de productos potencialmente valiosos, tales como sustitutos de fibras y de petróleo. Un ejemplo es la palmera babassú, *Orbingnya phalerata*, de la cuenca del Amazonas; una plantación de 500 árboles produce unos 125 barriles de aceite al año. Otro ejemplo sorprendente es el de la pervinca rosa, *Catharanthus roseus*, una planta pequeña y poco vistosa originaria de Madagascar. Produce dos alcaloides, vinblastina y vincristina, de extraordinaria eficacia contra la enfermedad de Hodgkin y la leucemia linfocítica aguda. Los ingresos que aportan estas dos sustancias superan los 100 millones de dólares anuales. En Madagascar hay cinco especies más de *Catharanthus*, pero ninguna de ellas ha sido objeto de estudio detenido. Una de estas cinco se encuentra en peligro de extinción debido a la destrucción de su hábitat.

La diversidad biológica, que se está deteriorando a pasos agigantados, sufrirá pérdidas masivas si se mantiene el ritmo actual. ¿Hay medidas para retardar el proceso de extinción y a largo plazo conseguir detenerlo? La respuesta es un cauto "sí". Igual que los países desarrollados, los países en vías de desarrollo (en su mayoría tropicales) deben ampliar sus inventarios taxonómicos y sus bibliotecas de referencia con el fin de cartografiar las especies del mundo e identificar los puntos calientes de conservación prioritaria. Al mismo tiempo, este proceso de conservación debe engranarse estrechamente en el progreso económico, sobre todo en los países donde la pobreza y la elevada densidad de población amenazan los últimos baluartes de los territorios vírgenes. Los biólogos y los economistas se han dado cuenta ya de que limitarse a acotar reservas, sin prestar atención a las necesidades de la población local, no es más que una solución a corto plazo de la crisis de la biodiversidad.

A tenor de la investigación reciente, bastan un conocimiento discreto de las especies silvestres y un esfuerzo modesto para obtener, muchas veces, mayores ingresos de la recolección continuada de los productos naturales que ofrece la selva que los recibidos de la deforestación con fines madereros y agrícolas. La ironía de deforestar la selva tropical para crear campos de labor o pastos para el ganado es que, pasados dos o tres años, el suelo, pobre en nutrientes, es ya incapaz de sustentar la actividad agrícola o ganadera que motivó su arrasamiento.

7. DIVERSIDAD DE LOS INSECTOS en las pluviselvas tropicales. Alcanza cifras astronómicas, con millones de especies, entre ellas esta hormiga de la isla de Sulawesi en Indonesia, que todavía están por inventariar. La hormiga, que es insólita por sus grandes ojos y sus movimientos parecidos a los de un robot, pertenece al género *Opisthopsis*, pero no ha recibido aún nombre específico. (Mark Moffett.)

Thomas Eisner, de la Universidad de Cornell, ha sugerido que, además de la compilación de inventarios biológicos, se establezcan programas para promover la prospección química en todo el mundo como método alternativo de búsqueda de nuevos productos. El Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos acaba de poner en práctica esta propuesta: su sección de productos naturales está investigando unas 10.000 sustancias por año en busca de actividad contra las células cancerosas y el virus del SIDA.

Resulta igualmente evidente que la investigación biológica debe estar ligada a la zonación y a la planificación regional de uso del suelo, dirigidas no sólo a conservar y promover el aprovechamiento de las especies silvestres, sino también a utilizar mejor la tierra convertida en campo y en monocultivo forestal. Un uso más inteligente del suelo incluye la elección de especies comerciales bien adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas locales, simultanear cosechas con rendimientos superiores a los de los monocultivos y practicar la rotación de cultivos en ciclos regulares. Estos métodos reducen la presión sobre la tierra de labor sin reducir su productividad global. No menos importantes son los estudios sociológicos y los programas educativos centrados en las necesidades de la gente que vive en la región.

Tengo suficiente fe en la naturaleza humana para esperar que, alcanzada la seguridad económica y consciente del valor de la riqueza biológica, el hombre tomará las medidas necesarias para proteger su ambiente. Este compromiso permitirá la ampliación de nuestros conocimientos y un enriquecimiento del espíritu que irá más allá de lo que ahora podemos imaginar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MASS EXTINCTIONS IN THE MARINE FOSSIL RECORD. David M. Raup y J. John Sepkoski, Jr., en *Science*, vol. 215, n.º 4539, págs. 1501-1503; 19 de marzo de 1982.

THE PRIMARY SOURCE: TROPICAL FORESTS AND OUR FUTURE. Norman Myers. W. W. Norton & Company, 1984.

CONSERVATION BIOLOGY: THE SCIENCE OF SCARCITY AND DIVERSITY. Dirigido por Michael E. Soulé. Sinauer Associates, Inc., 1986.

BIODIVERSITY. Dirigido por E. O. Wilson y Frances M. Peter. National Academy Press, 1988.

HOW MANY SPECIES ARE THERE ON EARTH? Robert M. May en *Science*, vol. 241, n.º 4872, págs. 1441-1449; 16 de septiembre de 1988.


PEPSI

El crecimiento demográfico

El desarrollo estabilizará la población; pero, ¿llegará a tiempo para evitar que el crecimiento demográfico y las técnicas agresivas causen un daño irremediable a la capacidad de supervivencia del hábitat terrestre?

Nathan Keyfitz

La vida humana tal como la conocemos ocupa un pequeño espacio y abarca un corto lapso de tiempo. Si representamos la Tierra como una esfera pintada de medio metro de diámetro, la mayor parte de los organismos quedarían englobados en la cobertura exterior de pintura y el hábitat de los cinco mil millones de seres humanos quedaría confinado a una finísima capa de la misma. La población comenzó a agruparse en pequeños poblados neolíticos hace apenas 10.000 años. La población humana total sumaba entonces entre cinco y diez millones de personas, un número insuficiente para que llegaran a afectar de un modo relevante el ecosistema en el que vivían y trabajaban. Esa situación se mantuvo durante la mayor parte de los 10.000 años siguientes. Sólo en los últimos decenios, la presencia humana ha comenzado a provocar cambios de magnitud comparable con la de los causados por la naturaleza durante prolongados períodos geológicos. Selvas que tardaron siglos en formarse y suelos acumulados a lo largo de millones de años se están consumiendo en el intervalo de una sola generación humana.

A mediados de siglo, la población mundial sumaba 2500 millones de habitantes. En 1987 superó los cinco mil millones. El crecimiento demográfico de los últimos cuarenta años ha sido equivalente al crecimiento total de la población humana durante los millones de años transcurridos desde la aparición de la especie hasta 1950. Según proyecciones de la División de Población de las Naciones Unidas, la población mundial continuará aumentando durante los próximos 35 años (hasta el 2025), hasta alcanzar los 8500 millones de habitantes. Según dicho pronóstico, de este incremento de 3200 millones, menos de doscientos millones corresponderán a los países desarrollados y al menos tres mil millones —o sea, un 95 por ciento— nacerán en los países menos desarrollados.

¿Debemos preocuparnos ante este incremento absoluto de 3200 millones de habitantes, o debemos felicitarnos por la reducción del índice de crecimiento? Entre 1980 y 1985, el crecimiento demográfico global fue de un 9 por ciento; según las proyecciones, entre 2020 y 2025 este índice será sólo de un 4 por ciento. Sin embargo, al aplicarse dicho índice a una base cada vez más numerosa, la curva demográfica absoluta continuará en su ascenso. El número absoluto de nacimientos no volverá a caer a los ya elevados niveles actuales hasta bien entrado el segundo cuarto del siglo XXI. Y la curva demográfica, evidentemente, proseguirá ascendiendo durante bastante tiempo más.

¿Debe interpretarse esto como un progreso o como un retroceso? ¿Podemos alegrarnos por la disminución de la proporción de la población mundial que pasará hambre, aunque represente un número creciente de personas en cifras absolutas? ¿Podemos felicitarnos por la reducción del índice de crecimiento demográfico cuando la destrucción ecológica no depende de éste, sino de las cifras absolutas de población?

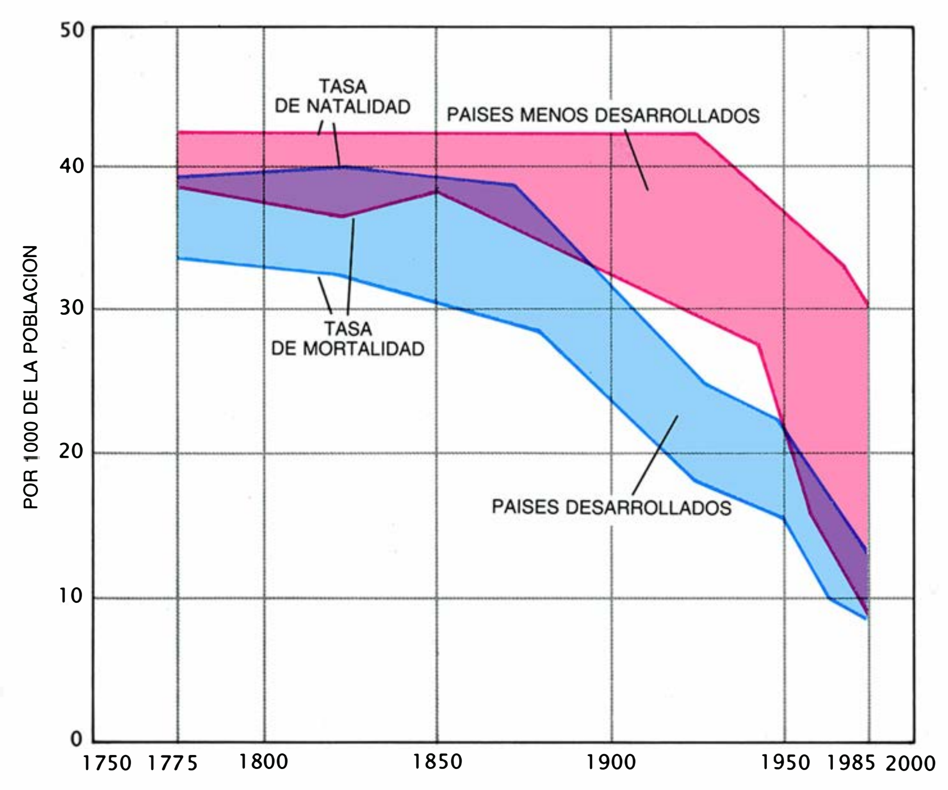
El crecimiento demográfico exponencial y la concomitante agresión contra el ambiente son tan recientes que cuesta apreciar el daño que se está causando. Durante largas eras, muchas sociedades buscaron multiplicar su censo; las familias y los reinos eran más poderosos cuanto mayor el número de trabajadores de que disponían. Con las altas tasas de mortalidad existentes, las poblaciones nunca crecían demasiado. La población humana aparecía como una entidad frágil en constante peligro de extinción, al menos a escala local, si no en el marco global. Las personas eran bienes preciosos para sus gobernantes, de manera análoga a como lo eran los esclavos para sus dueños.

En el siglo XVII, las tierras de Europa podían alimentar a un número de personas superior al necesario para labrarlas. Con lo cual los gobernantes podían hacer trabajar a la población excedente en la producción de tejidos, una tarea de ocupación intensiva. Los tejidos podían venderse en el extranjero a cambio de oro. Este es el principio del sistema mercantilista, practicado, entre otros, por Jean-Baptiste Colbert, ministro de finanzas de Luis XIV de Francia. Concepciones económicas similares se aplicaron en el resto de Europa. La mecanización de la producción no impidió que se siguieran empleando un gran número de trabajadores: aunque su productividad había aumentado, la demanda de productos crecía a un ritmo todavía más rápido. La fuerza de trabajo siguió constituyendo, por tanto, una mercancía valiosa.

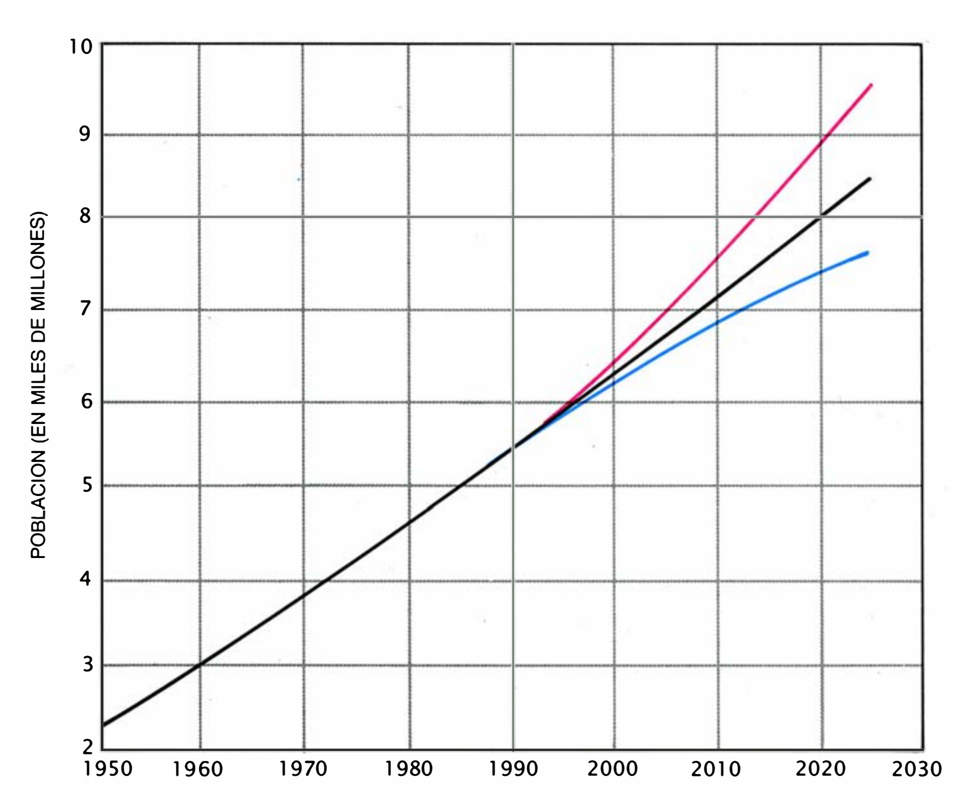
En la actualidad, simultáneamente con el rápido crecimiento demográfico,

1. LA EXTREMA MASIFICACION de la ciudad de México, la mayor urbe del mundo, obliga a millones de indigentes a vivir en tugurios como el que recoge la fotografía, sin alcantarillado ni otros servicios esenciales. Se estima que la población urbana, cifrada actualmente en 19,4 millones, supere los veinticuatro millones a finales de siglo.

NATHAN KEYFITZ nació en Montreal. Licenciado en ciencias por la Universidad McGill (1934) y doctor en sociología por la de Chicago (1952), ha ejercido la enseñanza en las universidades de Toronto, Chicago, California (Berkeley), Harvard y Ohio. Actualmente es profesor emérito de la cátedra Andelot en Harvard y emérito también de la cátedra Lazarus de la Universidad del estado de Ohio. Dirige el programa de demografía del Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados en Austria. El gobierno de Indonesia lo tiene por asesor.



2. INDUSTRIALIZACION de las regiones desarrolladas y descenso consiguiente de las tasas de mortalidad, continuado por la posterior caída de las tasas de natalidad, iniciada hace poco más de un siglo. Una vez completada esta "transición demográfica", el crecimiento demográfico neto (*zona sombreada*) se sitúa en torno al 0,4 por ciento. En los países menos desarrollados, en cambio, la disminución de las tasas de mortalidad no ha quedado compensada todavía por una reducción en la tasa de natalidad.

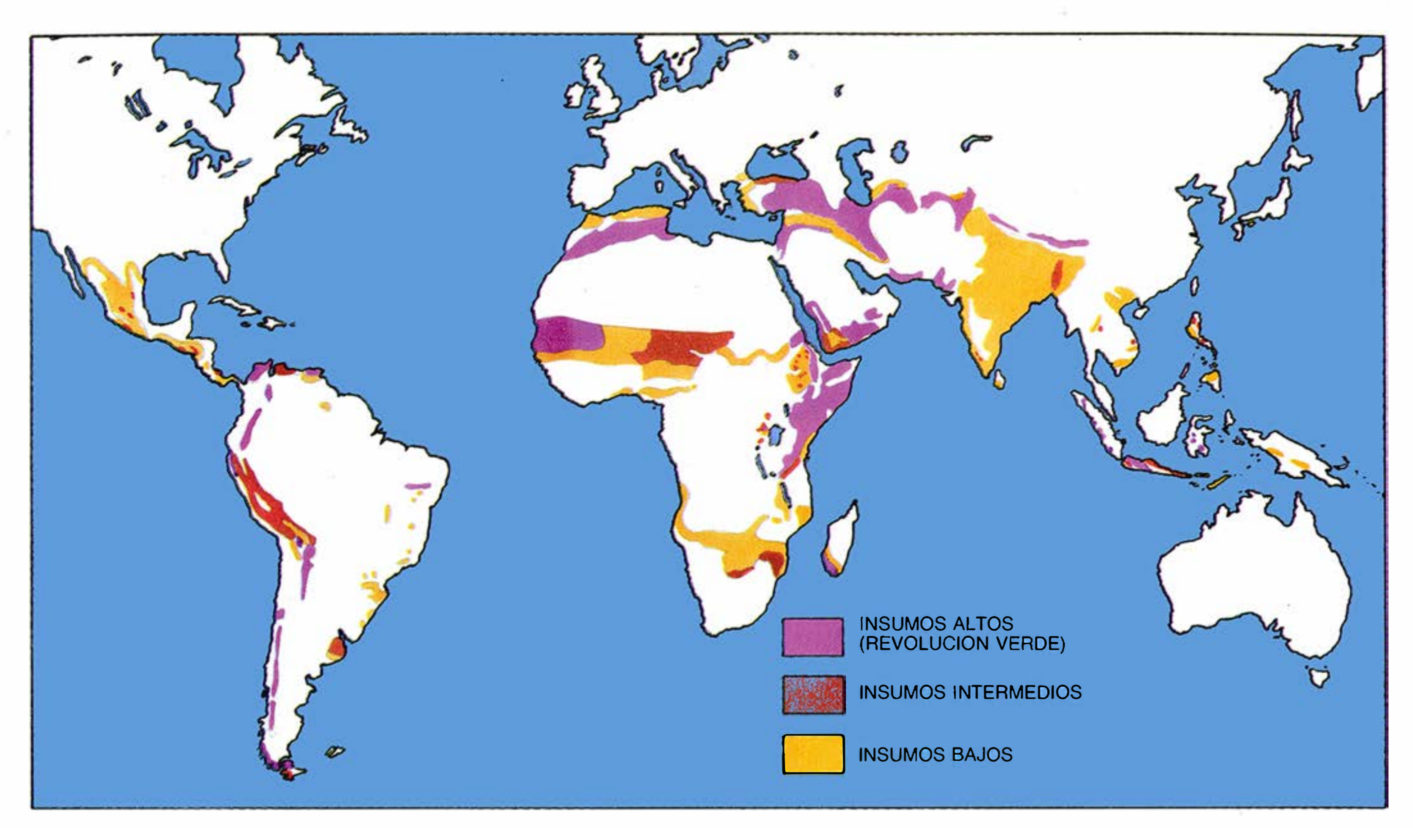


3. TRES PROYECCIONES del crecimiento de la población humana. Si el índice de crecimiento demográfico se mantuviera en torno al 1,74 por ciento anual actual hasta el año 2000 y descendiera a continuación hasta un 0,98 por ciento en el 2025, la población mundial llegaría a sumar casi 8500 millones de personas (*en negro*) en esa fecha. Con una caída más rápida del índice de crecimiento demográfico hasta un 0,59 por ciento para el año 2025, la población sería de unos 7600 millones (*en azul*) en esa fecha. Si el índice de crecimiento demográfico se elevase hasta un 1,9 por ciento a finales de siglo antes de iniciar su descenso, la población mundial superaría en 2025 los 9400 millones de personas (*rojo*). Datos facilitados por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Internacionales de las Naciones Unidas.

se están perfeccionando los métodos de producción. A ello se suma la propagación de las ideas igualitarias, tanto en los países menos desarrollados como en las naciones industrializadas. En consecuencia, se dan con mucha menor frecuencia las condiciones que prevalecieron hasta el siglo XIX, con la coexistencia de una baja densidad de población sobre territorios fértiles, técnicas intensivas de trabajo y la preeminencia del bienestar de los gobernantes sobre el de los trabajadores. Con una tecnología economizadora de trabajo ya no resulta tan sencillo transformar en oro la mano de obra. Al contrario, los países menos desarrollados piden créditos para conseguir el capital necesario con el que adquirir bienes de equipo, a fin de crear puestos de trabajo para su población. Pero el equipo, diseñado en los países altamente desarrollados, requiere un número relativamente reducido de trabajadores. Esto explica que el desempleo continuara aumentando en los países retrasados en la década de los setenta, aunque los créditos contraídos alcanzaron entonces su máxima cota.

¿Indica el paro que hay un exceso de población? ¿O más bien refleja una mala gestión de la economía, con el mantenimiento de salarios artificialmente altos para las personas que tienen empleo? Cualquier bien, incluida la fuerza de trabajo, permanecerá inutilizado si su precio se mantiene por encima de lo que pueden pagar los compradores. Ante la imposibilidad política de liberalizar los mercados de trabajo, los gobiernos intentan de partida que éstos se amplíen lo mínimo, conscientes de que cada nacimiento de menos significa un parado menos en el año 2010. Y dado que las mismas fuerzas políticas están promoviendo la rápida ampliación del acceso a la educación, es probable que este parado sea un titulado medio o superior y constituya, por tanto, una especial amenaza para la estabilidad política.

En resumen, el crecimiento demográfico, con la concomitancia de diversos aspectos de la tecnología y de la estructura política, pone en peligro la estabilidad política y social en los países menos desarrollados. A ello comienzan ahora a sumarse problemas ecológicos, tanto en las regiones en desarrollo como en las avanzadas. Uno de ellos es el de las inundaciones provocadas por la deforestación; la tala excesiva de bosques aparece directamente ligada a la demanda de material de



4. CAPACIDAD DE PRODUCCION LOCAL de alimentos, desbordada por las población en las regiones coloreadas del mapa. El estudio se basa en la tecnología agrícola local, diferenciando entre las zonas que sólo disponen de métodos tradicionales con bajos insumos (inputs) de capital (*en amarillo*), las que emplean insumos intermedios (*en rojo*) y, finalmente, otras que incluso emplean los altos insumos de capital asociados a la revolución verde (*en morado*).

construcción, combustible, nuevas superficies cultivables y capital extranjero de unas poblaciones en continua expansión. Tailandia acaba de prohibir la tala de árboles ante las fuertes inundaciones causadas por la deforestación; Malasia está considerando la misma medida, pese a la dependencia, de ambos países, de la madera y sus derivados como importante fuente de empleo y de divisas.

Las elevadas tasas de natalidad en las zonas rurales han obligado a muchos campesinos que viven de la agricultura de subsistencia a ocupar tierras marginales. En el estado indio de Rajasthan, el cultivo intensivo está agotando rápidamente los suelos áridos. En Java, los hijos de los campesinos, que ya no pueden subsistir con las parcelas resultantes de la subdivisión de la propiedad familiar heredada, desbrozan el terreno montañoso para cultivarlo, con un gran despilfarro de fuerza de trabajo y un alto coste ecológico. En Brasil, los campesinos de las regiones superpobladas han destruido millones de hectáreas de selva virgen en un intento de arrancar la subsistencia a unos terrenos esencialmente incapacitados para mantener la agricultura.

Al mismo tiempo, la emigración rural a la ciudad no cesa, generando una extraordinaria concentración urbana en todo el mundo. Cuando no existían los modernos medios de transporte y antes de la introducción del comercio internacional de cereales, el tamaño de una ciudad venía determinado por su disponibilidad de excedente agrícola, que solía proceder de las tierras circundantes.

Ahora, la situación ha cambiado: Ciudad de México y Caracas han crecido mediante el intercambio de petróleo por alimentos; Nueva Delhi, gracias a su predominio político y a la red ferroviaria de la India; y Calcuta, merced al transporte fluvial. La ayuda exterior ha intervenido para mitigar el hambre en las ciudades que carecen de productos comercializables, fomentando, de paso, un crecimiento demográfico ulterior.

Libres de la dependencia de la producción local para cubrir sus necesidades de alimentos y otras, las ciudades del mundo entero han entrado en una rápida expansión. Se ha previsto que la población urbana mundial se multiplique por seis entre 1950 y 2020. Y lo que es aún más grave, el crecimiento de las ciudades no dependerá ya tan estrechamente del nivel de desarrollo. Mientras en 1950 la población urbana de los países menos desarrollados representaba sólo el 17 por ciento del total, se prevé que para el año 2020 este porcentaje rebase ampliamente el 50 por ciento.

En algunos aspectos la concentración de la población en las ciudades es bastante favorable. Aunque nadie duda de que el aire de la ciudad de México es irrespirable, se trata de un fenómeno local. Pese a la insalubridad del aire, los habitantes de las ciudades gozan, probablemente, de una mayor esperanza de vida que sus vecinos del campo. Resulta más fácil proporcionar atención médica, educación y otros servicios a las poblaciones urbanas que a las rurales. De la concentración en las ciudades derivaría una menor repercusión directa en la supervivencia de los bosques, la vida silvestre, los océanos y en la biosfera en general.

Podría enhebrarse toda una argumentación en favor de la inocuidad ecológica de las ciudades, salvo por una característica de las poblaciones urbanas modernas: su movilidad sin precedentes. En todos los países, desarrollados o en desarrollo, la población de clase media o alta, predominantemente urbana, se desplaza constantemente: para acudir al trabajo, para salir de vacaciones, en viajes de negocios o de

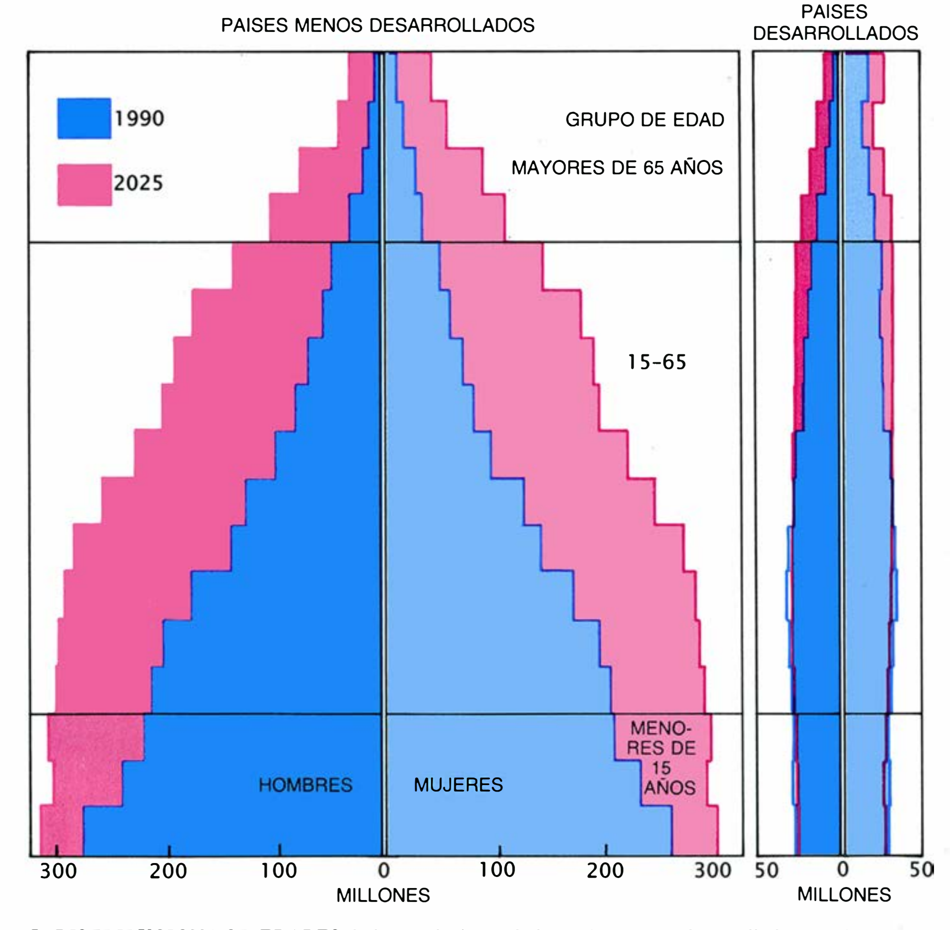
placer, en coche, autobús o avión. Y gran parte del daño ecológico infligido a la ecosfera está asociado a los viajes y desplazamientos. Un norteamericano de clase media come algo más que un campesino asiático, tiene más ropa y disfruta de mayor variedad de diversiones, pero ninguna de estas ventajas requiere una cantidad extravagante de recursos. Desde una perspectiva ecológica, la principal diferencia entre el "urbanita" norteamericano y el campesino asiático reside en la cantidad y forma de sus desplazamientos.

Hay unos 500 millones de vehículos matriculados en el planeta, que consumen a diario una media de 7,5 litros de combustible. Aproximadamente una tercera parte de la producción mundial de petróleo va a parar a sus depósitos. La mayor parte de este febril movimiento corresponde a los 1200 millones de habitantes de los países desarrollados, pero en el futuro casi todo el crecimiento neto en el uso de vehículos motorizados corresponderá a los países retrasados. De hecho, el parque automovilístico está creciendo a un ritmo más rápido que la población. Si esta tendencia se mantiene, el número de automóviles se habrá cuadruplicado en el año 2025.

El crecimiento demográfico absoluto, unido a la urbanización y una mayor movilidad, supone evidentes y graves riesgos, sobre todo para los países menos desarrollados. Es evidente, empero, que el crecimiento absoluto no podrá mantenerse indefinidamente. Tiene que existir un límite natural, un freno definitivo. La población de Nigeria, por ejemplo, con su tasa de crecimiento demográfico del 3,4 por ciento anual, se duplicaría cada 22 años y, de mantenerse el actual ritmo de crecimiento, dentro de 140 años, llegaría a ser equivalente a la población mundial actual. Huelga decir que esto no llegará a suceder. Si no disminuye su tasa de natalidad, aumentará la mortalidad. En efecto, queda descartada la posibilidad de una emigración a una escala suficiente para mitigar la presión demográfica y no existen otras salidas posibles.

Por tanto, el crecimiento demográfico deberá detenerse tarde o temprano. ¿Dónde se sitúan los límites naturales y cuáles son sus implicaciones? Malthus dio por sentado que el límite lo marcaban los alimentos, pero los progresos de la agricultura en los dos últimos siglos han puesto en entredicho esa hipótesis. Muchas naciones producen excedentes de alimentos e incluso, cuando llegan a padecerse hambrunas, la causa no es tanto la falta de alimentos cuanto, sobre todo, su mala distribución, acentuada a menudo por las condiciones políticas y la guerra civil, como en Sudán.

Sin embargo, los progresos en la agricultura no eliminan en absoluto otras limitaciones: las derivadas de la disponibilidad de espacios habitables adecuados, de las restricciones en la producción y de la capacidad finita del ambiente para absorber las agresiones a que se ve sometido. Esperar que la intervención de las limitaciones naturales pongan freno al crecimiento demográfico implica aceptar las hambrunas, un bajo nivel de vida, el desempleo, la inestabilidad política y la destrucción ecológica. Opciones inaceptables para la sociedad, que deberá buscar la forma de frenar el crecimiento demográfico y modificar la actividad humana de manera que resulte ambientalmente más benigna.



5. DISTRIBUCION POR EDADES de las poblaciones de los países menos desarrollados y países avanzados en 1990, comparada con las respectivas proyecciones para 2025. Un 37 por ciento de la población de los países retrasados no ha cumplido todavía los 15 años. Aunque se reduzcan sus índices de crecimiento demográfico, sus poblaciones continuarán aumentando rápidamente cuando todos esos jóvenes lleguen a la edad fértil. La fuerza de trabajo de estos países se ampliará a un ritmo todavía más rápido que su población total. La población mundial en edad laboral se triplicará de aquí al 2050. Datos proporcionados por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Internacionales de la ONU.

Ante todo es preciso, pues, responder a un doble interrogante: cómo frenar el crecimiento y cómo acelerar el movimiento hacia este objetivo. Uno de los fenómenos sociales más universalmente observados y de más difícil explicación de los tiempos modernos es la transición demográfica: la disminución de las tasas de mortalidad y de natalidad hasta nuevos niveles más bajos asociada a la industrialización. La disminución de la mortalidad se explica en parte por los progresos de la medicina y, en importante medida también, por las mejoras en la nutrición y otros componentes del nivel de vida. Puesto que lo primero que disminuye es la mortalidad, las poblaciones experimentan un amplio crecimiento durante la transición; así, por ejemplo, la población de Gran Bretaña se cuadriplicó en el curso del siglo XIX.

Antes o después, a la disminución de las tasas de mortalidad le sigue una caída en las tasas de natalidad. Es más, la

CONDICIONES SOCIOECONOMICAS	IMPLANTACION DE LOS PROGRAMAS DE PLANIFICACION FAMILIAR EN 1982								MEDIA
	FUERTE		MODERADA		DEBIL		MUY DEBIL O NULA		
	PORCENTAJE NACIONAL		PORCENTAJE NACIONAL		PORCENTAJE NACIONAL		PORCENTAJE NACIONAL		
ALTAS	HONG KONG	80	CUBA	79	COSTA RICA	66	PARAGUAY	36	
	SINGAPUR	71	PANAMA	63	BRASIL	50			
	TAIWAN	70	JAMAICA	55	VENEZUELA	49			
	COREA	58	TRINIDAD/TOBAGO	54	PERU	43			
	COLOMBIA	51	FIJI	38	CHILE	43			
	MEXICO	40							
MEDIA		60		58		50		36	55
MEDIAS ALTAS	CHINA	69	TAILANDIA	58	ECUADOR	40	IRAN	23	
	SRI LANKA	57	FILIPINAS	45	TURQUIA	40	SIRIA	20	
			REPUBLICA DOMINICANA	43	HONDURAS	27	GHANA	10	
			MALASIA	42	EGIPTO	24	NICARAGUA	9	
			EL SALVADOR	34	MARRUECOS	19	ZAIRE	3	
			TUNEZ	31	GUATEMALA	18	ZAMBIA	1	
					ARGELIA	7			
MEDIA		63		42		25		11	30
MEDIAS BAJAS	INDONESIA	48	INDIA	32	HAITI	19	BOLIVIA	24	
			VIETNAM	21	ZIMBABUE	14	NIGERIA	6	
					KENYA	7	LESOTHO	6	
					PAQUISTAN	6	BIRMANIA	7	
					PAPUA NUEVA GUINEA	5	CAMERUN	2	
					SENEGAL	4	UGANDA	1	
					LIBERIA	1	KAMPUCHEA	0	
MEDIA		48		27		8		6	12
BAJAS			BANGLADESH	19	NEPAL	7	BENIN	18	
					TANZANIA	1	SUDAN	5	
							SIERRA LEONA	4	
							EITOPIA	2	
							SOMALIA	2	
							YEMEN	1	
							BURUNDI	1	
							CHAD	1	
							GUINEA	1	
							MALAWI	1	
							MALI	1	
							NIGER	1	
							BURKINA FASO	1	
							MAURITANIA	1	
MEDIA				19		4		3	4
MEDIA		59		44		23		7	26

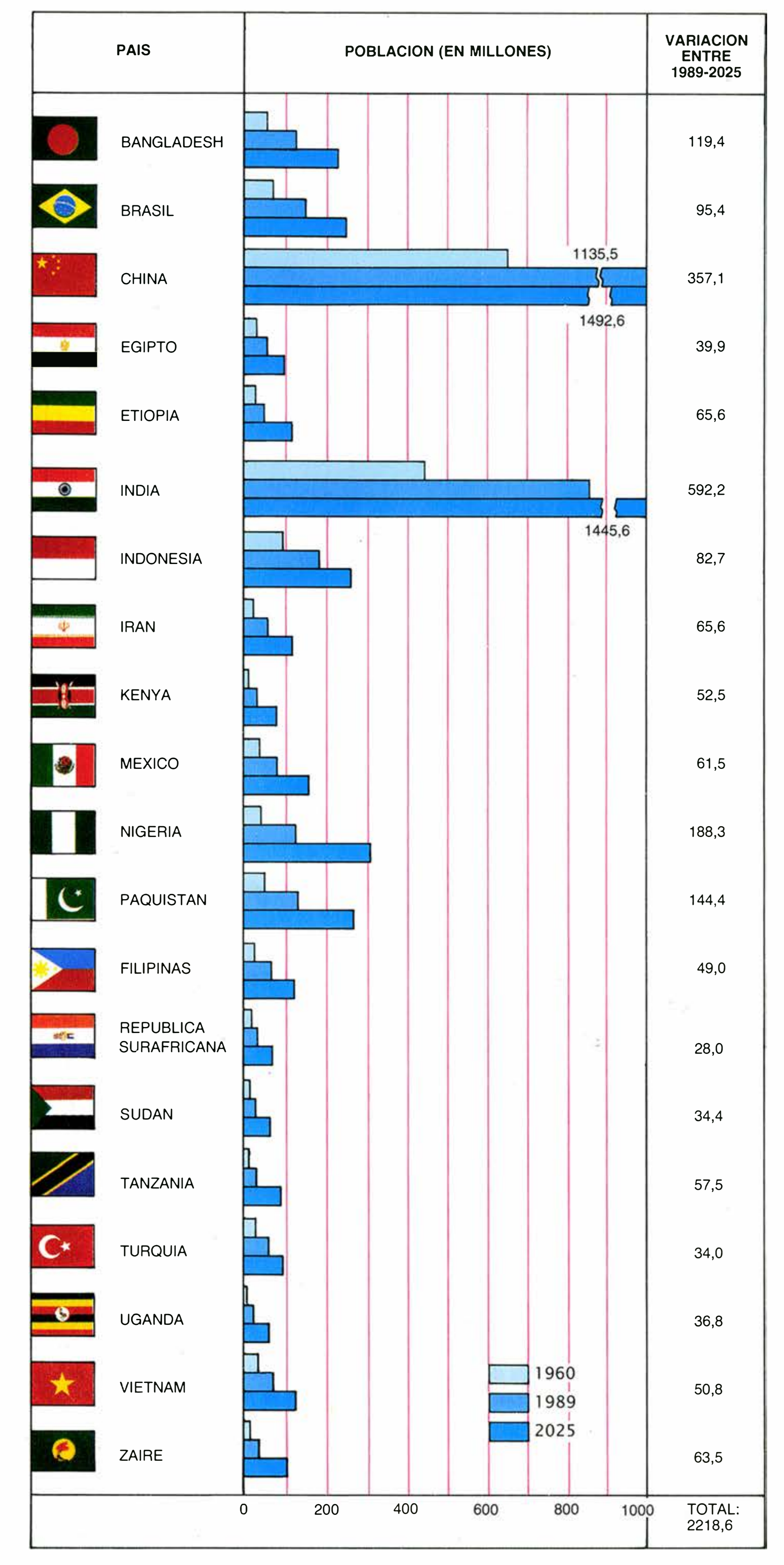
6. EFICACIA de los programas de planificación familiar, medida en porcentajes de parejas que utilizan métodos anticonceptivos en los países menos desarrollados. En igualdad de condiciones socioeconómicas, el porcentaje de parejas que emplean métodos anticonceptivos es superior en los países con programas de mayor implantación. Estudio realizado por Robert J. Lapham, del Servicio de Demografía y Salud, y W. P. Mauldin, de la Rockefeller.

natalidad no sólo disminuye hasta el punto suficiente para compensar el número de fallecimientos (la situación habitual a lo largo de casi toda la historia), sino que decae por debajo del nivel de sustitución. Las poblaciones de los países europeos, los Estados Unidos y Japón cuentan con un número desproporcionadamente elevado de personas en edad fértil debido a las altas tasas de fecundidad del pasado reciente. En consecuencia, continuarán creciendo durante algún tiempo. Pero, pasada la actual generación, la población de estos países podría disminuir entre una décima parte y un tercio en cada nueva generación.

En un análisis de la transición demográfica, ¿qué debe considerarse: las bajas tasas de natalidad del presente o su alto nivel en el pasado? Para unos, las personas siempre habrían querido verse libres de la carga de los hijos, pero carecían de métodos anticonceptivos adecuados (o eficaces). Para otros, la gente desearía tener hijos pensando en la seguridad en la vejez, la ayuda que podrían aportar y establecer vínculos con otras familias a través del matrimonio. Las mujeres estaban subordinadas a sus maridos e, independientemente de sus otras actividades, el marido siempre podía exigirle que procreara. Esta pauta de conducta se inculcaba a niños y niñas desde la más tierna infancia y una doctrina pronatalista, de influencia religiosa en particular, sustentaba toda la estructura.

Pero la doctrina religiosa, de suyo, no es factor determinante de la fecundidad, según prueba el reciente descenso de la natalidad en algunas de las sociedades católicas más desarrolladas, como Italia, Austria y la provincia de Quebec. Otros elementos del mundo social ponen sordina a la influencia de la religión sobre las tasas de natalidad cuando aumenta el nivel de desarrollo de un país. Un factor social de primer orden es la mejora de la posición de la mujer en la comunidad. Así, la tasa de natalidad está cayendo en regiones, por ejemplo, en Java, donde las mujeres gozan de mayores derechos y una mejor educación que en otras regiones musulmanas, mientras se mantienen altas en aquellas donde el estatus social de la mujer es bajo, como en Paquistán, Bangladesh y algunos países árabes.

La industria y el comercio modernos permiten el acceso de la mujer a una fuente autónoma de ingresos y la independencia económica de sus maridos. Los hijos se independizan de sus padres al incorporarse al mercado de trabajo y los padres se independizan de sus hijos en la medida en que pueden contar con la seguridad social y sus ahorros personales. ¿Se ven compensados los esfuerzos de criar a un hijo cuando éste ya no representa una fuente de ayuda económica? Si se conocieran los mecanismos que provocan el



descenso de las tasas de natalidad, las naciones industrializadas podrían subsanar su deficiente fecundidad y las naciones pobres sabrían cómo frenar su natalidad.

Cualesquiera que sean estos mecanismos, es seguro que las tasas de natalidad de los países menos desarrollados se reducirán con la mejora de su nivel de desarrollo. Ahora bien, una población numerosa y en aumento constituye un freno para el desarrollo económico, que tendría que ser enorme para que sus ventajas pudieran beneficiar a la totalidad de la población. Ello significa que el ambiente se verá sometido a unas presiones sin precedentes. Brasil afirma que la tala de la selva amazónica es imprescindible para su desarrollo y rechaza las llamadas del extranjero que piden moderación. En algunas zonas, el crecimiento demográfico es tan alto que ya se ha alcanzado el límite de las materias primas y de la capacidad de tolerancia del ambiente; estas presiones han frenado el desarrollo económico que podría poner coto a la natalidad. A la vista de estos riesgos, jamás se insistirá suficientemente en la urgencia de la regulación de la natalidad.

Al margen de otros posibles determinantes de origen más complejo, existen abundantes pruebas de que la información sobre los métodos de planificación familiar y el acceso a los anticonceptivos han sido factores decisivos para el descenso de la fecundidad en todos los países. Las tasas brutas de natalidad han disminuido entre un 25 por ciento y un 60 por ciento en veinte años en los países de Asia —China, Indonesia, Tailandia y Corea del Sur— que establecieron programas de planificación familiar en la década de los sesenta. En Túnez, el descenso de la tasa de natalidad casi dobló su celeridad durante los diez años siguientes a la introducción del programa, en comparación con los siete años precedentes. La tasa de natalidad de Mauricio, que rondaba el 40 por 1000 antes de 1965, año en que se puso en marcha un programa de control de la natalidad, se redujo por debajo del 25 por 1000 en los ocho años siguientes a la introducción del mismo. México inició un programa en 1973 y su tasa de natalidad disminuyó de un 45 a

7. EN ESTOS VEINTE PAISES que se encuentran en vías de desarrollo se producirá un setenta por ciento del incremento de la población mundial previsto para el año 2025. Son datos suministrados por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales Internacionales de las Naciones Unidas.

un 38 por 1000 en unos cuatro años; actualmente se cifra en un 31 por 1000.

A economistas y políticos les gustaría saber en qué medida pueden atribuirse estos descensos a los programas y en qué medida se habrían producido de todos modos, como consecuencia de los avances socioeconómicos generales. Según cálculos de Timothy King, del Banco Mundial, realizados sobre datos procedentes de 19 países en vías de desarrollo, un 39 por ciento del descenso de la natalidad es consecuencia de los programas de planificación familiar y un 54 por ciento cabría atribuirlo a los avances socioeconómicos generales. Otros investigadores, aplicando esencialmente el mismo método sobre datos distintos, conceden a los programas de planificación familiar del 10 al 40 por ciento de los descensos observados en las tasas de natalidad. Ningún estudio serio ha dejado de anotar la influencia de los programas.

Merece la pena señalar aquí, sin embargo, que las primeras etapas de la modernización generan a menudo incrementos transitorios en la fecundidad, debido al característico abandono de los métodos tradicionales de control de natalidad, como la prolongación de la lactancia materna y la abstinencia postparto. En consecuencia, el influjo real de los programas de planificación familiar es bastante mayor de lo que a primera vista se desprende de los datos iniciales.



8. INYECCION, en una mujer de Kenya, del anticonceptivo Depo-Provera en un centro asistencial. Ella y su marido ya tienen cuatro hijos, la menor de los cuales aparece también en la fotografía. "Si tenemos más, ¿cómo los mandaremos a la escuela, cómo les daremos de comer?", pregunta ella. El gobierno de Kenya ha comenzado a considerar la introducción de programas de planificación familiar, lo que supondría un importante giro en relación a su política anterior. De mantenerse el actual índice de crecimiento superior al cuatro por ciento, su población de 25,1 millones se habrá duplicado en 17 años.

El programa de planificación familiar de Indonesia se inauguró oficialmente en 1970. En 1980, el Comité Nacional de Coordinación de la Planificación Familiar había establecido centros de información y de distribución de medios anticonceptivos en más de 40.000 aldeas, la mayoría en Java y Bali. Estos centros suelen hallarse vinculados a cooperativas agrícolas y servicios de asistencia médica, y forman por tanto parte integral de los esfuerzos de desarrollo del país. Operan como centros sociales en los que se distribuyen anticonceptivos gratuitos. Los programas educativos difunden el ideal de una familia "reducida, feliz y próspera". El bombardeo de mensajes públicos en favor de la planificación familiar es incesante: la tonadilla de la campaña nacional de planificación familiar suena cuando un tren cruza un paso a nivel, el imán habla de la contracepción en las mezquitas locales (el Islam acepta el control de la natalidad, excepto en el caso de la esterilización permanente) y cada tarde a las cinco suenan sirenas para recordar a las mujeres que deben tomar la píldora.

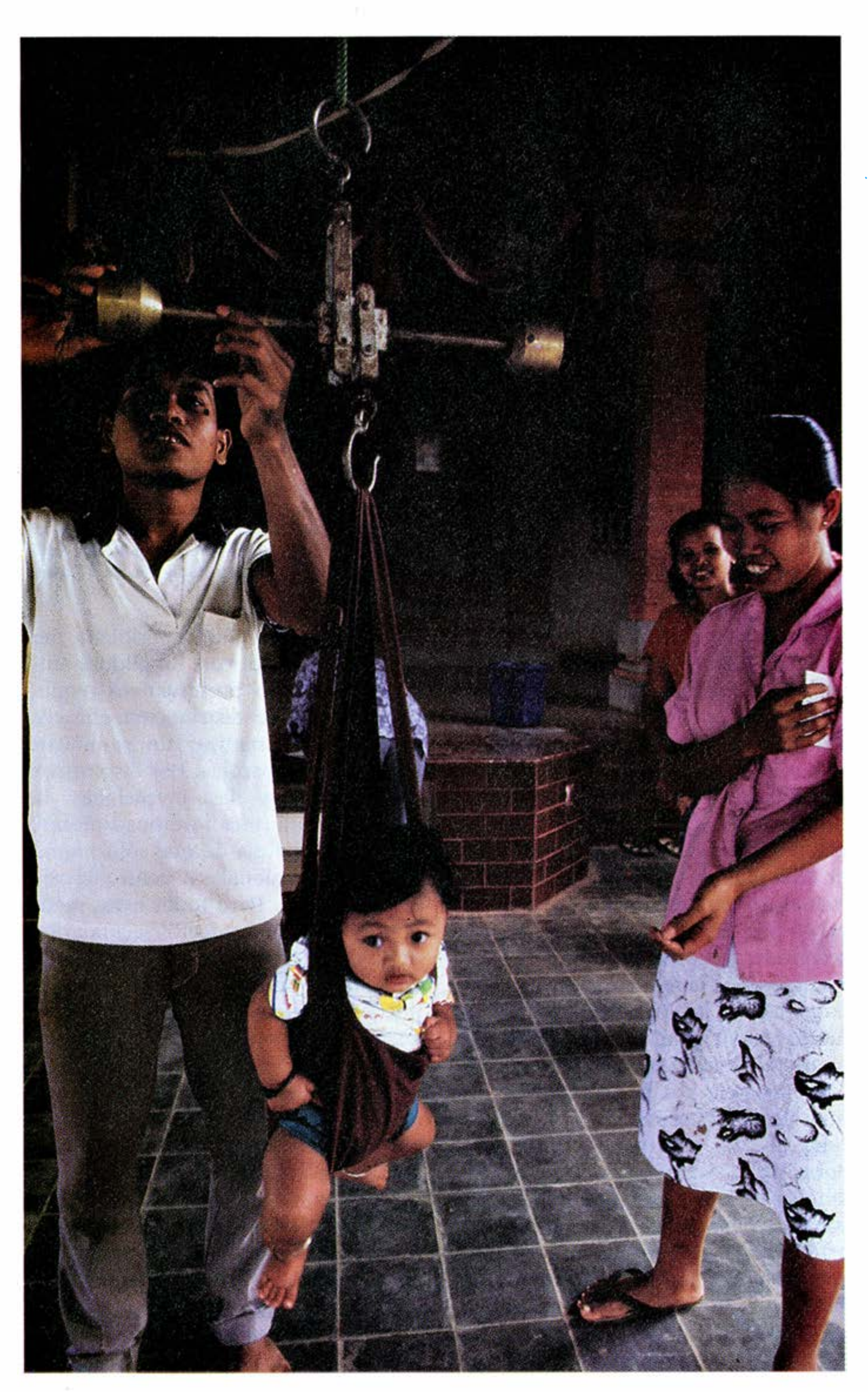
Esta campaña ha cosechado un éxito notable en Indonesia. La tasa de fecundidad ha descendido de 5,6 a 3,4 hijos por mujer desde 1972; en 1972 sólo 400.000 parejas practicaban el control de la natalidad, mientras que en 1989 dicho número se había elevado a más de 18,6 millones. Al mismo tiempo, la mortalidad infantil se ha reducido en un 40 por ciento. Un dato interesante a considerar es que el aborto es ilegal en Indonesia; la reducción de la tasa de natalidad se ha logrado gracias a un fuerte apoyo gubernamental y comunitario en favor de la campaña, a la labor educativa y a la distribución gratuita de anticonceptivos a todas las parejas que los soliciten. Los organizadores de la campaña de planificación familiar del país esperan lograr que, con el tiempo, las parejas con suficientes recursos paguen sus anticonceptivos; su propósito es conseguir que la gente se responsabilice de la planificación familiar y llegue a considerar los anticonceptivos como un artículo que vale la pena comprar.

Importa, sobre todo, ofrecer a las parejas la posibilidad de escoger entre una gama lo más amplia posible de métodos anticonceptivos. La píldora anticonceptiva y los preservativos requieren sistemas de distribución eficaces, capaces de garantizar un suministro continuo a las parejas. Los dispositivos intrauterinos y las inyecciones de Depo-Provera (una hormona sintética) ofrecen la ventaja de que sólo requieren visitas ocasionales al centro de asistencia médica. Pero todos estos métodos pueden causar efectos secundarios, desde irregularidades en el ciclo menstrual hasta infecciones pélvicas, que pueden influir negativamente sobre la decisión de las mujeres de adoptar un método y utilizarlo de manera continuada. Uno de los resultados más prometedores de las recientes investigaciones en este campo es el desarrollo de anticonceptivos de implantación subcutánea, como el Norplant, con un período de eficacia de hasta cinco años. A pesar de todo es necesario encontrar nuevos métodos anticonceptivos más seguros, cómodos y baratos.

En algunos países de Asia y sobre todo de Africa, la fuerte influencia de la cultura pronatalista resta eficacia a los programas de planificación familiar, que han tenido escaso éxito en Paquis-

tán, Nepal y Kenya. En efecto, estos programas sólo pueden lograr cierto éxito en los países económica y socialmente dispuestos a aceptarlos. Según los resultados de una serie de encuestas encuadradas dentro del Estudio Mundial de Fecundidad, segmentos apreciables de la población de la mayor parte de los países menos desarrollados desean tener familias menos numerosas de lo que tradicionalmente era la norma. Un dato que, como mínimo, da pie a cierto optimismo.

La incidencia de la presencia humana no depende sólo del número de personas, sino también de su lugar de asentamiento en la biosfera y de su actividad económica. ¿Podrían mitigarse los efectos nocivos para el ambiente modificando las prácticas económicas, en vez de intentar frenar el crecimiento demográfico? En Europa, Norteamérica y gran parte de Asia, la cultura tradicional ha tenido siempre en cuenta su impacto a largo plazo sobre el medio ambiente: las buenas prácticas agrícolas y forestales tradicionales incluían el mantenimiento de la tierra en unas condiciones capaces de asegurar indefinidamente su potencia productiva.



9. UNA MADRE INDONESIA observa cómo pesan a su hijo. El programa nacional de salud infantil subvenciona el control mensual del peso de los niños, que permite a las madres controlar el desarrollo de sus hijos. El programa fomenta la idea de que las familias poco numerosas ofrecen mejores cuidados.

Pero la tradición no es siempre proteccionista. Los madereros del Nepal y los pastores del Sahel poseen rutinas que —sometidas a la presión del crecimiento demográfico— resultan imprevisoras. Podríamos decir, como en el caso de muchas otras sociedades, que si no fueran tantos, destruirían menos; si sus prácticas fuesen más adecuadas, también destruirían menos. Si hubiera menos automovilistas, se consumiría menos combustible y se generaría menos contaminación; si la gente se acostumbrara al transporte público, se alcanzarían resultados igualmente favorables.

En el trasfondo de la economía operan factores de estricto signo cultural. Lo demuestra el ejemplo siguiente: las ciudades austríacas disponen de piscinas municipales y centenares de personas acuden a ellas andando los fines de semana; por contra, y con idéntica finalidad, sus congéneres norteamericanos viajan 150 kilómetros o más en coche hasta la playa. En todas partes, las personas acaudaladas no resisten la tentación de ponerse al volante y recorrer 150 kilómetros o más, o de embarcarse en un avión y sobrevolar el país para nadar y tomar el sol. ¿Se desviará la cultura hacia una dirección que respete la biosfera? La pregunta tiene difícil respuesta, tanto en el caso de los bañistas norteamericanos como en el de los pastores africanos.

En todas partes se observa esta simetría entre el tamaño de la población, por un lado, y unas prácticas nocivas, por otro. De ahí el interminable debate sobre cuál es la política a adoptar. Hay quienes argumentan que el número de personas resulta poco perjudicial en sí mismo, aunque exacerba los efectos de unas prácticas inadecuadas; otros opinan que si bien deben rectificarse estas prácticas inadecuadas, y nadie lo duda, habría que controlar simultáneamente las cifras de población.

¿Qué aspectos de la política demográfica aparecen asociados a la agresión contra el planeta? Estos hacen referencia a la relación entre las cifras de población y la tecnología agrí-

cola e industrial y deberán abordarse en un contexto de conflictos entre países menos desarrollados y países avanzados y de guerras civiles e internacionales en los primeros. El camino del progreso será duro para las poblaciones afectadas; en muchos lugares, el nivel de dificultad será proporcional al tamaño de la población.

A la larga, las comunidades tomarán conciencia de las repercusiones de su propia actividad procreadora en la futura estabilidad ecológica de su país y del planeta. Si la superpoblación socava la base ecológica de una economía, su crecimiento económico se verá frenado necesariamente. Las personas acabarán comprendiendo que es preferible tener menos hijos más sanos que muchos hijos sin posibilidades de educación ni de empleo. Una buena política será la que haga costoso para los ciudadanos lo que es gravoso para la nación. Los costes ecológicos (y de otro tipo) que representan los nacimientos para la comunidad deberían transferirse a los propios padres. Sin embargo, ningún gobierno quiere gravar los excesos procreadores de una forma que pueda perjudicar a los niños ya nacidos. Una preocupación que hace muchísimo más difícil diseñar una política familiar eficaz, que una política de consumo, por ejemplo.

Todas estas preocupaciones atañen, sobre todo, a los países menos desarrollados, donde se registrarán la inmensa mayoría de los futuros incrementos demográficos. Algunos expertos se muestran también preocupados ante la posibilidad de que el crecimiento demográfico de las naciones desarrolladas pronto llegue a ser nulo e insisten en la necesidad de adoptar medidas preventivas urgentes. Sin embargo, estimular el crecimiento demográfico en los países desarrollados podría sentar un mal ejemplo y, lo que es más grave, podría interpretarse como un mensaje con connotaciones racistas: vosotros sois demasiados y nosotros demasiado pocos.

Sin embargo, las naciones avanzadas pueden hacer algo más por el planeta y en favor del desarrollo económico, y no limitarse a dar un buen ejemplo en materia de control demográfico. Pueden prestar mayor atención a las repercusiones de sus políticas en los países menos desarrollados. No pueden pretender cobrar la deuda de las naciones en desarrollo si no aceptan sus exportaciones. Imponer aranceles a las exportaciones de las regiones menos desarrolladas e insistir en el pago de la deuda exterior significa mermar la capacidad de estas regiones para mantener a sus poblaciones.

Algunos productos agrícolas y forestales, pensemos en los cacahuetes de Senegal o en la madera de Tailandia, son medios importantes de obtención de divisas para estos países, pero su explotación puede conllevar un alto coste ecológico. Las subvenciones que estimulan la producción de excedentes agrícolas en Europa y los Estados Unidos tienen efectos nocivos para el ambiente que podrían evitarse. El envío de los excedentes de trigo y maíz a los países menos desarrollados constituye una forma de ayuda caritativa deseable para mitigar la escasez de alimentos en situaciones de emergencia, pero no cuando los cereales extranjeros actúan como factor disuasorio de la producción agrícola local.

La gestión responsable no impide que el desarrollo industrial contamine el aire y el agua y ejerza otros efectos destructivos. La educación puede aumentar la sensibilidad ante esa agresión y reducir las tasas de natalidad, mitigando a la larga las presiones sobre el ambiente. Un nivel suficiente de desarrollo económico debería ir acompañado del correspondiente control de todos los problemas, incluidos los ecológicos. Pero un ambiente demasiado maltratado puede frenar, si no bloquear, el desarrollo futuro.

Por tanto, el problema que se plantea a cada país es el de cómo alcanzar un crecimiento económico suficiente sin destruir el entorno, eventualidad que impediría cualquier futuro avance económico. La mayoría de las naciones menos desarrolladas son conscientes de que su progreso podría ser más rápido y la destrucción del ambiente más lenta si sus poblaciones no crecieran tan deprisa. No todas están igualmente capacitadas para diseñar y abordar las medidas que se desprenden de esta consideración.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ECOSCIENCE: POPULATION, RESOURCES, ENVIRONMENT. Paul R. Ehrlich, Anne H. Ehrlich y John P. Holdren. W. H. Freeman and Company, 1970.

ECONOMIC CONSEQUENCES OF POPULATION CHANGE IN THE THIRD WORLD. Allen C. Kelley en *Journal of Economic Literature*, vol. 26, n.º 4, págs. 1685-1728; diciembre de 1988.

WORLD DEVELOPMENT REPORT, 1989. World Bank/Oxford University Press, 1989.

Nuevas estrategias agrarias

La investigación agraria aportará nuevas técnicas para aumentar la producción de alimentos sin que el suelo, el agua y la diversidad genética se vean alterados. Falta lograr que los agricultores las utilicen

Pierre R. Crosson y Norman J. Rosenberg

Así que pasen cien años, nuestro planeta habrá alcanzado los 10.000 millones de habitantes, el doble más o menos de los que cuenta ahora. Si las previsiones realizadas por los demógrafos del Banco Mundial son correctas, la población se estabilizará, en el mismo nivel en el que se mueven ya muchos países avanzados. ¿Podrá alimentarse nuestra especie cuando se alcance ese nivel? Probablemente sí. La producción mundial de alimentos podría crecer a un ritmo bastante más lento que el actual y, a pesar de ello, seguiría habiendo suficiente alimento para 10.000 millones de bocas.

Sin embargo, la respuesta justa no puede simplificarse tanto. Habrá de aumentar el suministro de alimentos y tendrá que hacerlo sin agredir al medio natural. Ello exige la introducción de nuevas técnicas que minimicen los procesos de erosión, desertización, salinización del suelo y otros de repercusión negativa sobre el entorno. Estamos seguros de que estas técnicas se desarrollarán si las organizaciones encargadas de la investigación agraria, que ya existen, adquieren el necesario protagonismo y reciben apoyo financiero. Pero también estamos convencidos de que el desarrollo de una nueva técnica no es el problema más difícil con que se enfrenta la agricultura mundial; lo es la propia sociedad.

Para que las nuevas técnicas, menos perjudiciales, ejerzan su efecto, deben utilizarse. Se introducirán en la explotación familiar, siempre y cuando aporten un beneficio para el agricultor. En una economía de libre mercado, este beneficio viene dado generalmente en forma de ganancias. Pero los mercados no están bien equipados para proteger el agua, la diversidad genética y otros recursos de parejo estilo, sobre los que es difícil establecer derechos de propiedad. Desde nuestro punto de vista, el reto más importante que tiene la política agraria es el de diseñar mecanismos institucionales que incentiven al agricultor a ponderar esos recursos preciosos en su verdadero valor social.

La urgencia del desarrollo de nuevas técnicas en la explotación agraria será aproximadamente proporcional al ritmo de disminución de los recursos naturales empleados en agricultura. De estos recursos, tres —suelo, agua y diversidad genética— son decisivos. Sobre ellos centraremos aquí nuestra atención.

El suelo dedicado a la agricultura se encuentra amenazado, en muchas partes del mundo, por varios tipos de degradación. Entre los más importantes, destaca la erosión por el viento y agua, con la consiguiente pérdida de productividad; amén de la degradación de pastizales en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas y el encharcamiento y salinización de las zonas de riego. Todos estos procesos pueden considerarse bajo el término general de desertización (aun cuando tal concepto, en la mente popular, se retrinja a la expansión del desierto hacia pastos o campos de labor próximas). Nosotros lo entenderemos en el sentido general.

No obstante, estas estimaciones globales deben tomarse con cautela. Primero, porque las cifras varían a tenor del sentido que se dé al término desertización. Segundo, porque la mayoría de las regiones del planeta no disponen de datos exactos sobre los procesos de degradación a que se ven expuestos. Fijémonos en la erosión, por ejemplo. Los EE.UU. son el único país del mundo que cuenta con una valoración razonablemente exacta y extensa de la erosión del suelo y de su efecto sobre la producción. De acuerdo con la misma, si las tasas actuales de erosión persistieran en los próximos 100 años, la producción agraria bajaría de un 3 a un 10 por ciento. Con el empleo de técnicas idóneas, los aumentos de producción en las cosechas, tradicionalmente modestos, compensarían con creces aquellas pérdidas.

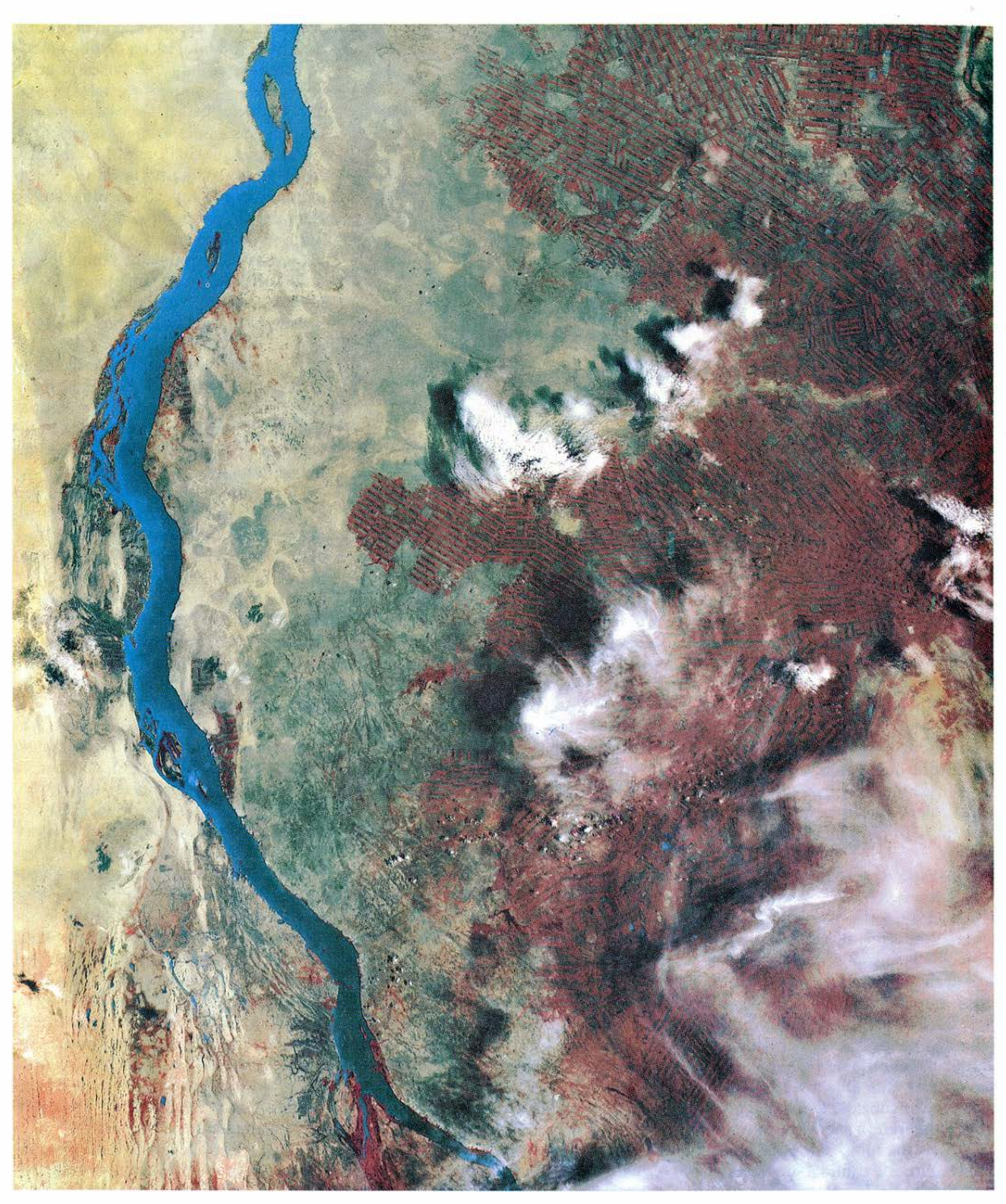
Se han hecho estimaciones sobre la erosión progresiva en otras partes del mundo, en algunas de las cuales se dan graves pérdidas. Pero un estudio minucioso de dichos cálculos a cargo de expertos, incluida una revisión llevada a cabo por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación en 1984, asevera que carecen del necesario rigor científico. No hay duda de que la erosión y la pérdida consiguiente de productividad revisten una gravedad obvia; así, en Nepal, zonas de India, las tierras altas de Africa oriental y zonas de los Andes. Ahora bien, menos clara resulta la importancia relativa de estas mermas con respecto a la producción total mundial de alimentos. Las previsiones apocalípticas sobre el asunto deberían tomarse, pues, con un grano de escepticismo.

Ni siquiera las regiones que han estado sometidas a desertización deben reputarse perdidas sin remisión para la agricultura. Una gran parte de las tierras que el PANU considera desiertas son de pastos de montaña. Se trata de zonas que en todas partes se están degradando, aunque en algunos casos adquiere tintes dramáticos, como el de la

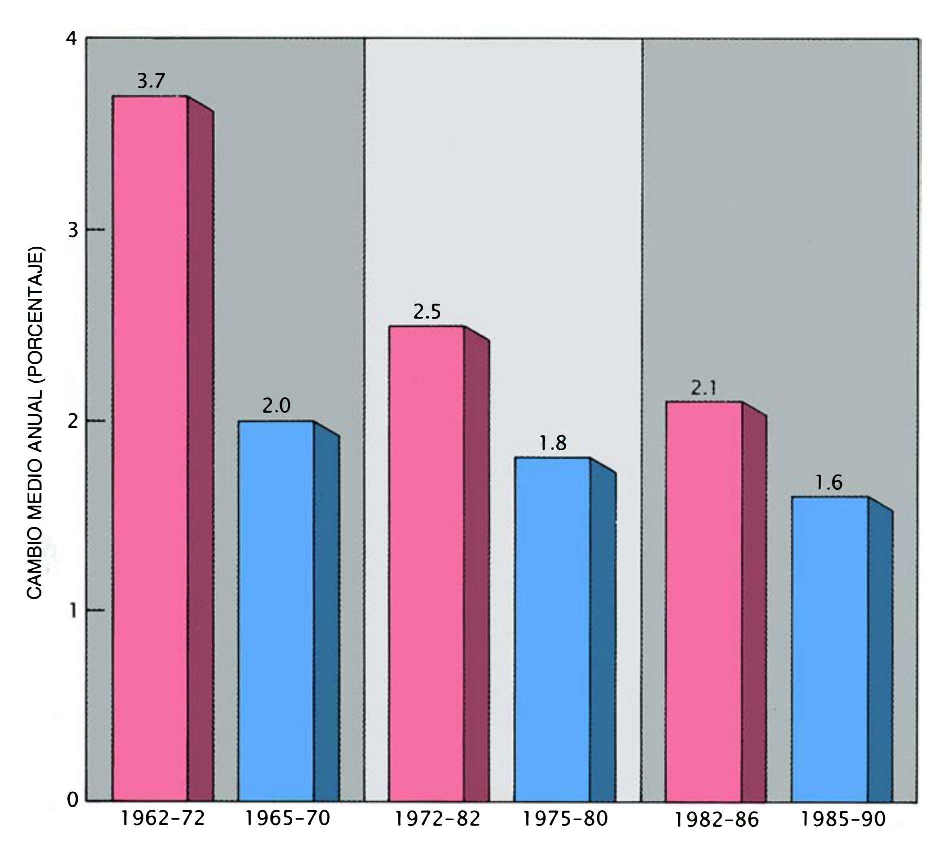
PIERRE R. CROSSON y NORMAN J. ROSENBERG trabajan en Recursos para el Futuro, con sede en Washington. Crosson se doctoró en economía por la Universidad de Columbia. Es miembro de la división de la energía y recursos naturales. Rosenberg se doctoró en física del suelo y meteorología por la Universidad de Rutgers; dirige el programa de recursos climáticos. Los autores desean agradecer la ayuda y consejo de Charles A. Francis, de la Universidad de Nebraska en Lincoln, Stephen R. Gliessman, de la de California en Santa Cruz, James R. Rhoades, del Laboratorio de Salinidad de los EE.UU. en Riverside, y Charles F. Hutchinson, de la Universidad de Arizona.

zona del Sahel, en Africa. El crecimiento rápido de la población, allí y en el cuerno de Africa, tras la segunda guerra mundial, condujo a un aumento del pastoreo que, por sí solo, hubiera provocado una caída de la productividad. El proceso de degradación se intensificó con una sequía pertinaz que comenzó en la década de los años sesenta y ha continuado desde entonces de forma intermitente.

Ello no obstante, las imágenes tomadas por los satélites muestran que las zonas esquilmadas del Sahel pueden recuperarse. En efecto, en años de lluvias, la llamada Ola Verde de vegetación se desplaza, adentrándose en el Sahel, más hacia el norte de lo que lo hace en años secos. Es probable que el retorno de una vegetación de alta calidad a las áreas agotadas por el pas-



1. TIERRAS DE LABOR REGADAS, destacadas en rojo en esta fotografía tomada sobre el Nilo a su paso por Sudán. En los últimos 70 años, los proyectos de regadío han aumentado la productividad en esa zona. Más de la mitad del crecimiento de la producción agraria mundial se debe al regadío.



2. CRECIMIENTO DE LA PRODUCCION MUNDIAL; ocurre a un ritmo más célere que el seguido por la población. La figura muestra, en porcentajes, el aumento de la producción anual total de cereales (*rojo*) y de la demografía (*azul*). Si el suministro de alimentos lograra mantenerse a ese ritmo (o incluso menor), habría suficiente comida para una población de 10.000 millones dentro de 100 años.

toreo no sea inmediato, pero sí parece que, con programas de pastoreo controlado, se podría recuperar mucha de la superficie convertida en desierto. Por supuesto, el problema reside en mantener un "control estricto" allí donde se dé un crecimiento rápido de la población y allí donde exista, por tradición, un indiscriminado acceso a la tierra. Como veremos después, las dificultades con las que se enfrenta la agricultura mundial surgen de la falta de instituciones que regulen tales situaciones, pero no de la intervención de procesos naturales inexorables.

Otro aspecto de la desertización es la salinización. En aquellas áreas donde el agua de riego contiene gran cantidad de sales disueltas, el uso impropio de la misma y la falta de drenaje producen la acumulación de sales en el suelo, que daña las plantas. Según James D. Rhoades, del Laboratorio de Salinidad de los EE.UU. en Riverside, California, el agua de riego puede contener hasta 3,5 toneladas de sal por 1000 metros cúbicos. Dado que los cultivos requieren, a menudo, entre 6000 y 9500 metros cúbicos de agua por hectárea y año, esa cantidad de tierra puede recibir hasta 33 toneladas de sal. Las plantas toman una pequeña parte de esa sal quedando el resto en el suelo, una vez evaporada el agua.

Hay técnicas para tratar la salinización de los suelos. Verbigracia, el lavado de la zona rizosférica con un exceso de agua; pero, si se hace así, el problema a menudo se agrava. Si el agua de drenaje retorna al canal de riego, el contenido de sal del agua que utilizarán los agricultores, curso abajo, se verá aumentado. El problema fundamental de toda actuación para reducir la salinización reside en la ausencia de instituciones y normas legales que exijan al agricultor evaluar las consecuencias de sus acciones sobre otros agricultores que han de aprovecharse de la misma canalización curso abajo.

La conversión de zonas rústicas en urbanas es una consecuencia inevitable del desarrollo económico. Transformación que, en ocasiones, se considera una amenaza contra la superficie de suelo destinada a campos. En un estudio que el Departamento de Agricultura y el Consejo para la Calidad del Ambiente de EE.UU. acometió en los años setenta se llegó a la conclusión de que, para los años noventa, la conversión de tierras agrícolas podría conducir al país a una situación de escasez de recursos, tan importante como la de la crisis energética de entonces. Un análisis posterior ha quitado hierro al tema y no ha vuelto a tratarse en profundidad.

En las naciones con menos superficie cultivada que en los EE.UU. (por ejemplo, en Asia), la urbanización puede suponer un peligro mayor. Pero, una vez más, los datos disponibles indican que, ni siquiera en Asia, el problema es alarmante. En el norte de la India (donde habita la mitad de la población del país) y en Bangladesh, el suelo urbano y el cultivado aumentaron de 1950 a 1980. La razón de que ambos se extendieran hay que buscarla en la conversión de zonas forestales, y por ello no incluidas en las categorías anteriores, para fines urbanos o agrícolas. En la India, el suelo urbano aumentó, en 1980, la décima parte de lo experimentado por la superficie cultivada; en Bangladesh, aumentó en una octava parte. Por consiguiente, tampoco en los países superpoblados como los citados el rápido crecimiento de la superficie urbana conlleva, necesariamente, la merma de campos de labor.

Aparte de la extensión dedicada al cultivo, los otros recursos naturales importantes para la agricultura son, lo dijimos antes, el agua y la diversidad genética; el agua, sobre todo, presenta un interés relevante. En efecto, los datos del Banco Mundial sobre el período que va de 1960 a 1980 señalan que debióse al regadío una fracción de entre el 50 y el 60 por ciento del aumento general de la producción agraria en los países en vías de desarrollo. Aunque los campos de regadío pueden extenderse todavía más, su expansión se verá encarecida ya que se comenzó por explotar las fuentes de agua de menor coste.

Más aún, el crecimiento demográfico y económico incrementan la demanda de agua, compitiendo por ella con la agricultura; ésta se sitúa en desventaja, pues la rentabilidad de lo invertido en agua por las labores del campo es, por lo general, menor. Además, en algunas partes de los países en vía de desarrollo, el suministro de agua para regadíos se encuentra amenazado por el aterramiento de los embalses. Aunque éstos se hallan preparados para aceptar determinada cantidad de tierra, en algunas áreas la deforestación, el pastoreo abusivo y las prácticas de cultivo erosivas conducen a un aterramiento mayor del previsto. Aun cuando se trata de un ejemplo anecdótico, pone de manifiesto que el aterramiento no constituye una amenaza despreciable.

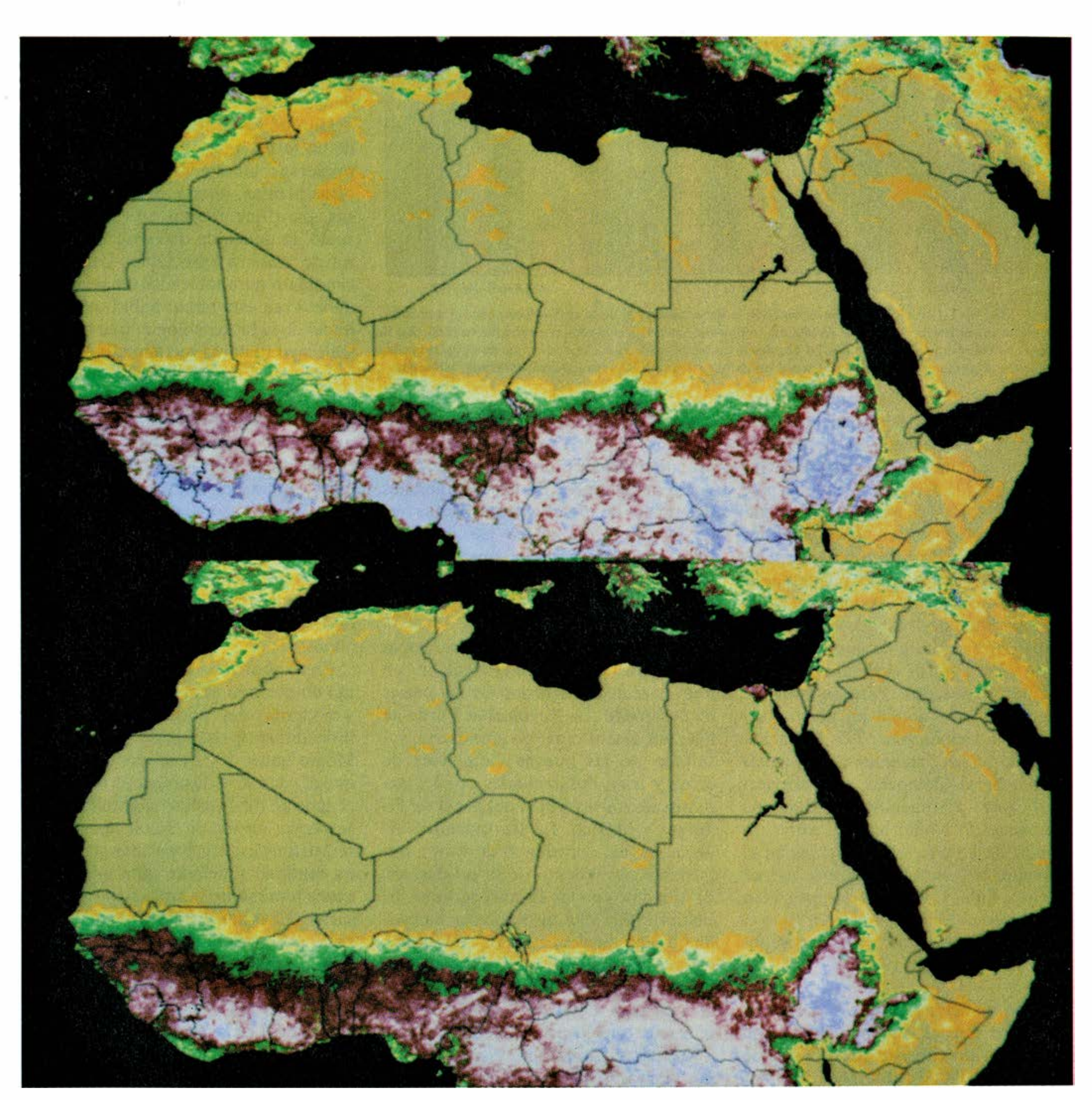
En riesgo se encuentra también la diversidad genética de la agricultura; peligro, por otro lado, más difícil de determinar. Desde la segunda guerra mundial, se ha registrado la tendencia a abandonar la práctica de la rotación

de cultivos en favor de los monocultivos, del que el maíz puede ser un ejemplo. El monocultivo puede abocar en una notable reducción de la diversidad genética, de consecuencias imprevisibles. Un caso típico fue lo ocurrido en 1970, en los EE.UU., donde la producción de maíz cayó en un 15 por ciento por el ataque de un hongo bien adaptado al "citoplasma-*T*" que se había incorporado en la mayor parte de la semilla híbrida plantada en el cinturón cerealista de los Estados Unidos. Un año después, los productores de semilla dejaron de confiar en el citoplasma-*T*, decidiendo restablecer una base genética más variable.

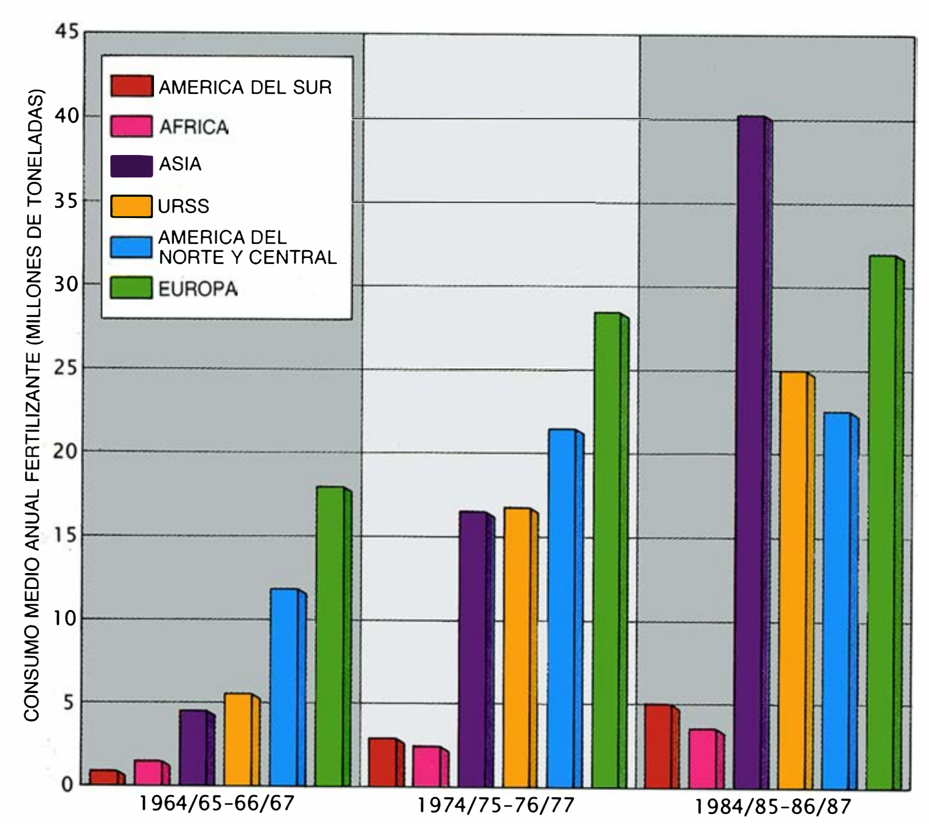
Nos hemos ocupado hasta aquí de los recursos naturales que son decisivos para que la producción agraria continúe creciendo. Pero también está claro que el crecimiento de ese sector puede acarrear funestas consecuencias para el ambiente en general, como se expone, en detalle, en otra parte de este número. El clareo de bosques para la creación de campos de labor reduce la variedad de la vegetación y comporta efectos adversos sobre el hábitat animal. En la pluviselva tropical, ese tipo de acciones puede producir graves daños [véase el artículo de Edward O. Wilson "La biodiversidad, amenazada"].

Asimismo, algunos de los gases traza liberados por las actividades agrícolas, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido de nitrógeno, actúan sobre las radiaciones contribuyendo al efecto de invernadero [véase "Un clima cambiante" de Stephen H. Schneider].

Ni que decir tiene que la agricultura



3. OLA VERDE DE PERIODICIDAD ANUAL. Aparece cuando la vegetación se reactiva por efecto de las lluvias estacionales, moviéndose hacia el norte, en la zona del Sahel, al sur del Sahara. Estos mapas se han confeccionado por ordenador sobre datos recibidos desde satélites. La vegetación se muestra en escala de colores que van del kaki (poca o ninguna vegetación), al morado (vegetación densa). En 1980 (*mapa superior*), un año de precipitación "normal", la Ola Verde se extendió más hacia el norte que en 1984 (*mapa de abajo*), de precipitaciones desastrosamente bajas. Una extensa sequía y un pastoreo abusivo han hecho de la zona del Sahel una región fuertemente desertificada; pero, incluso en ella, el proceso puede ser reversible.



4. USO DE FERTILIZANTES; sirve cómo medida de la incidencia de la agricultura sobre el ambiente. La ilustración muestra el total de fertilizante empleado en las principales regiones del mundo. En la mayoría de ellas, el uso de abonos se ha disparado en los últimos años. No se dispone de datos sobre las otras sustancias empleadas en agricultura (incluidos los pesticidas). (Diagramas realizados por Gabor Kiss.)

no es la causa responsable exclusiva del efecto de invernadero y de la pérdida del hábitat animal. Sin embargo, algunos riesgos que acechan al entorno sí le son imputables; pensemos, por ejemplo, en el uso, cada vez más extendido, de pesticidas y fertilizantes. Su empleo, unido a las prácticas de regadío y la plantación de variedades cultivadas de alto rendimiento, ha promovido, en buena parte, el notable aumento de la producción agraria experimentado en las últimas décadas. Pero se trata de substancias que conllevan efectos secundarios perjudiciales. Los fertilizantes y pesticidas presentes en las aguas pueden causar dolencias, que van desde el cáncer a la metahemoglobinemia (síndrome del "niño azul"), como resultado de un exceso de nitratos en el agua que bebemos. Aunque se carece de datos fiables, la rápida propagación del empleo de estos agentes por todo el mundo tiene, sin duda, algunas implicaciones serias para la salud.

De lo mencionado hasta aquí se infiere que el reto planteado a la agricultura no consiste sólo en dar de comer a los 10.000 millones de habitantes que habrá dentro de cien años, sino también en lograr el nivel de producción suficiente con un deterioro del ambiente menor que el actual. Este doble objetivo se denomina, a menudo, "agricultura viable". (También, "congruente" y "sostenible".) El logro de esa meta requerirá un continuado apoyo, a largo plazo, de las instituciones nacionales de investigación y de los trece institutos del grupo asesor sobre investigación agraria internacional (GAIAI, o, por sus siglas inglesas, CGIAR), con sede en el Banco Mundial, en Washington D.C.

El GAIAI constituye una herramienta importante para la investigación en nuevas técnicas agrarias en los países en desarrollo. La Revolución Verde de los años sesenta fue, en gran parte, resultado de las nuevas variedades de arroz y trigo desarrolladas por los expertos de los institutos del GAIAI de Filipinas y México. La Revolución Verde, a su vez, contribuyó de forma importante al aumento de la producción de alimentos en las últimas décadas. El Instituto Mundial de Recursos ha estimado que, desde mediados de los años sesenta hasta el ecuador de los ochenta, la producción de alimentos creció en una tasa anual del 2,4 por ciento, mientras que la producción cerealista lo hizo a un ritmo aún mayor, del 2,9 por ciento.

Estos notables aumentos, combinados con una deceleración de la tasa de crecimiento demográfico hasta menos del 2 por ciento, constituye la base de nuestro optimismo de que la producción de alimentos seguirá los pasos del crecimiento de población [véase "El crecimiento demográfico" de Nathan Keyfitz]. Sin embargo, para conseguir este objetivo, se necesitará un flujo constante de nuevas técnicas que sólo podrán proceder del GAIAI y de institutos estatales de investigación, en países desarrollados lo mismo que en los retrasados. ¿Qué técnicas se necesitan? Aunque se podrían señalar un buen número de innovaciones, destacaremos tres categorías en razón de su importancia: las que reducen el deterioro medioambiental de los pesticidas y fertilizantes, las que reducen la demanda del agua de riego y las que inciden en el aumento del rendimiento de los cultivos.

Uno de los principales componentes de un fertilizante es el nitrógeno. Si se pudieran manipular biológicamente otras plantas, aparte de las leguminosas, para que fijaran nitrógeno en el suelo, la demanda de fertilizantes caería de manera apreciable. Un primer candidato para tal transformación es el maíz. Para esta tarea, habrá que echar mano de la biotecnología, que hace posible manipular directamente el material genético de un organismo. La biotecnología ha demostrado su valor en cierto número de aplicaciones relacionadas con la producción animal, y la obtención de un maíz fijador de nitrógeno del aire no es, en absoluto, utópica. A este propósito, Frederick Ausubel, de la facultad de medicina de Harvard, acaba de señalar que se trata "simplemente de un trabajo de ingeniería extremadamente complejo", que podría quedar resuelto en los próximos 50 años.

En el ahorro de agua de riego se están empleando ahora técnicas antiguas y modernas. La "cosecha del agua", un procedimiento conocido en Oriente Medio antes de la era cristiana, logra que el paisaje se disponga de forma que el agua de lluvia caída en grandes zonas se recoja en sistemas colectores, o se redistribuya sobre áreas más pequeñas, en cantidad suficiente para que humedezca totalmente la zona rizosférica del suelo. El rendimiento de sistemas de riego por gravedad, que emplea estanques y canalizaciones, el método quizá más extendido, puede mejorarse mediante una alta tecnología: el nivelado por láser. Los láseres pueden emplearse para guiar máquinas que nivelen el terreno, posibilitando una rápida y uniforme inundación de los campos.

Otro sistema, el riego gota a gota, requiere un grado de tecnificación mayor que el de los sistemas de riego por gravedad. Esta modalidad encontró am-

plia aceptación en Israel, EE.UU. y otros países en los años setenta; hoy se practica en los cuatro puntos del globo. Los sistemas de riego gota a gota depositan el agua directamente sobre una pequeña zona al pie de cada planta. El agua discurre por tuberías, generalmente de plástico, enterradas o en superficie; el "emisor", una suerte de orificio perforado, deja el agua al pie de la planta.

Los sistemas de goteo, junto con otros, amén de elevar el rendimiento del uso del agua de riego, facilitan también la lucha contra la salinización. Una estrategia nueva aconseja mantener las sales (y otros contaminantes, como los pesticidas) en el terreno, en lugar de trasladarlos al suministro de agua. Esto se lleva a cabo por retorno del agua residual al sistema de riego de la explotación, aplicándola de nuevo de forma estratégica a los campos, en tiempos y formas que minimicen el efecto de las sales que transporta.

El riego gota a gota es muy útil a este respecto. Gran parte del daño producido por las sales sobre los cultivos se debe a la sal que el agua deja, una vez que se ha evaporado. Las altas concentraciones de sal en la zona próxima a las raíces de las plantas reducen la presión osmótica, lo que dificulta la absorción del agua del suelo circundante. Mediante esta modalidad de riego, sin embargo, se aporta un suministro continuo de agua a las raíces y se evita la acumulación de sales hasta una concentración que dificulte la absorción hídrica.

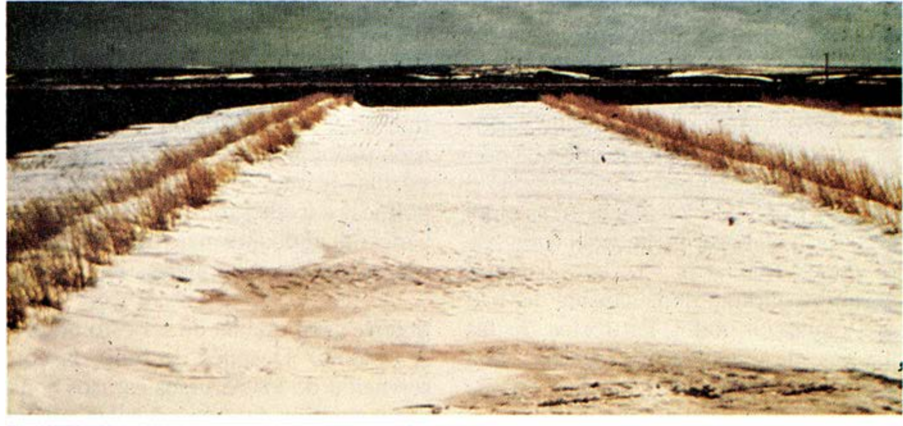
Otro grupo de innovaciones agrícolas entrañan soluciones menos complejas, excepto la de la aplicación de principios de integración (a veces antiguos) a los cultivos. El concepto de cultivo múltiple incluye la rotación de cultivos, cultivos mixtos (en ocasiones, de árboles y plantas anuales en el mismo campo) y siembra de leguminosas en campos de cereal, así como cultivos dobles en los que crecen dos o más cosechas simultáneamente en un mismo campo. El sistema de cultivo múltiple posee una antigua tradición. Se empleaba en América Central desde épocas precolombinas para el cultivo del maíz, judías y calabazas. El maíz sirve para el emparrado de las judías, éstas enriquecen de nitrógeno el suelo y las calabazas proveen una cubierta vegetal, reduciendo la erosión, el apelmazamiento del suelo y las malas hierbas.

Los árboles se pueden incluir en los sistemas de cultivo múltiple. En Europa, norte de Africa, URSS y las grandes llanuras de Canadá y EE.UU. sirven de barreras cortavientos para proteger los cultivos de la acción mecánica perjudicial y del secado de los mismos que la exposición al viento conlleva. En otros lugares, se plantan árboles para sombra, en combinación con plantas que la agradecen, tales como el café, cultivos anuales (maíz, judías) o pastos. Los árboles aportan forraje, frenan la erosión y producen leña para combustible. En Africa occidental, la hojarasca del árbol *Acacia alba* enriquece el suelo para beneficio de varios cultivos cereales y hortalizas que crezcan junto a él.

Además de sus ventajas ecológicas, el cultivo múltiple puede aumentar los rendimientos de forma importante. En el centro-oeste norteamericano, los agricultores experimentan el cultivo del maíz en mezcla con otras plantas de menor talla. En un experimento de campos de regadío, al oeste de Nebraska, se levantan barreras contravientos hechas de filas dobles de plantas de maíz, situadas cada 15 hileras de una plantación de remolacha azucarera. El efecto protector contra el viento aportado por el maíz aumentó el rendimiento de azúcar en un 11 por ciento. Asimismo, la mayor penetración de la luz solar y un aporte más rápido de dióxido de carbono a las hojas de maíz mejoraron el rendimiento de éste en un 150 por ciento.

El cultivo múltiple tiene otra ventaja importante. En los campos donde se rotan los cultivos de forma regular, las plagas, malas hierbas, insectos y otros agentes patógenos no se pueden adaptar a unas condiciones únicas, razón por la cual no proliferan tan deprisa. Cuando dos tipos de cultivo se encuentran en un mismo campo, las plagas de uno de ellos son amortiguadas por los predadores que habitan en el otro. Estas beneficiosas interacciones pueden aprovecharse de intento para crear la base de un método que se denomina "control integrado de plagas" (CIP).

El CIP abarca una amplia gama de técnicas, control químico de las plagas, manipulación mecánica del suelo y muchas estrategias biológicas; minimiza los efectos negativos de los productos químicos sobre el ambiente; hace uso también de pasadas frecuentes de maquinarias y aparatos el control de las plagas. Un buen ejemplo nos viene de los campos algodoneros de Texas. El control integrado de plagas en





5. GRAMA ALTA, una planta perenne. Protege al trigo de invierno en un experimento realizado por el Servicio de Investigación Agraria del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, cerca de Sidney, en Montana. En el invierno (*fotografía superior*), las barreras de grama alta retienen la nieve formando una capa uniforme. La nieve defiende, por aislamiento, las plantas de trigo contra las temperaturas extremadamente bajas. En primavera, la nieve se funde, suministrando la humedad necesaria para el crecimiento inicial de las plantas. Una vez pasado el letargo invernal, el trigo comienza a crecer (*fotografía inferior*), y la grama actúa de barrera protectora contra la acción erosiva del viento.

Centro	Año de creación	Localización	Misión
Centro Internacional de Agricultura Tropical	1966	Cali, Colombia	Mejora de la producción de judía, mandioca, arroz y vacuno en los Trópicos del Hemisferio Occidental
Centro Internacional de la Papa	1971	Lima, Perú	Mejora de la patata en los Andes y desarrollo de nuevas variedades en zonas subtropicales
Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo	1943 1966	Ciudad de México	Mejora de maíz, trigo, cebada y triticale
Panel Internacional de Recursos Genéticos Vegetales	1974	Roma, Italia	Coordina una red internacional de centros sobre recursos genéticos (germoplasma)
Centro Internacional de Investigación Agrícola en Zonas Secas	1977	Aleppo, Siria	Se centra en agricultura en regiones áridas y semiáridas del Norte de Africa y Oeste de Asia
Instituto Internacional de Investigación de Cultivos en Trópicos Semiáridos	1972	Andhra-Pradesh, India	Mejora de la cantidad y previsiones de producción de alimentos en zonas tropicales semiáridas
Instituto Internacional de Investigaciones en Política Alimentaria	1974	Washington, D.C.	Emite normas basadas en recomendaciones de las agencias gubernamentales e internacionales sobre problemas alimentarios nacionales, regionales y mundiales
Instituto Internacional de Agricultura Tropical	1967	Ibadan, Nigeria	Responsable de la mejora mundial de hilaza, batata, boniato, mandioca, arroz y judía, entre otros
Laboratorio Internacional de Investigación de Enfermedades Animales	1974	Nairobi, Kenya	Control de la tripasonomiasis (transmitida por la mosca tsé-tsé) y la theileriosis (transmitida por garrapatas)
Centro Internacional Ganadero de Africa	1974	Addis-Abbeba, Etiopía	Investigación y desarrollo de la producción ganadera. Sistemas de comercialización y recopilación de información para la industria
Instituto Internacional de Investigación del Arroz	1960	Los Baños, Filipinas	Selección y mejora de variedades de arroz. Banco de germoplasma
Servicio Internacional para la Investigación Agraria Nacional	1980	La Haya, Holanda	Apoyo a instituciones nacionales de investigación agraria
Asociación para el desarrollo de Africa Occidental	1971	Moravia, Liberia	Autosuficiencia en arroz para Africa Occidental y mejora de variedades adaptadas a las condiciones agroclimáticas y socioeconómicas del área

6. SISTEMA GAIAI (Grupo Asesor sobre Investigación Agraria Internacional): consta de 13 centros de investigación agrícola. Nuevas variedades de arroz se desarrollaron en el sistema GAIAI y fueron responsables de la "Revolución Verde" que aumentó la productividad agraria en los años sesenta.

ese estado norteamericano tiene varios aspectos: elegir variedades de algodón que maduran temprano (sembrándolo en asincronía con las plagas típicas del algodón), favorecer la población de predadores de las plagas, tales como el gorgojo y gusano de la cápsula del fruto, y quemar todos los restos de las plantas después de la cosecha, una práctica que destruye muchas larvas. Este sistema funciona muy bien para el algodón en Texas. Procedimiento que, sin embargo, no ha conocido el mismo éxito en los campos algodoneros del delta del Mississippi, lo que indica que el control integrado de plagas debe de aplicarse adaptándolo a las exigencias locales.

Estos ejemplos muestran que muchos de los métodos agrícolas, nuevos y antiguos, se van extendiendo cada vez más. Será necesario introducir regularmente mejoras comparables en el futuro, si se desea compensar la escasez de tierra de labor, de agua y de recursos medioambientales. Si las instituciones de investigación agraria consiguen el apoyo necesario (y la tendencia actual nos hace ser moderadamente optimistas), tales mejoras llegarán con toda probabilidad. La tarea más difícil estriba, a nuestro juicio, en crear las políticas e instituciones capaces de convencer al agricultor para que adopte las nuevas técnicas y prácticas agrarias.

Pero, ¿por qué ha de ser esto un problema? Después de todo, la conservación de los recursos escasos constituye un bien para todos. ¿Por qué los agricultores no mostrarían interés en adoptar las prácticas necesarias para la conservación de los recursos? La respuesta está en que la escasez social de recursos no siempre cala, en su justa medida, en la conciencia de los individuos, debido a que se carece de los mecanismos adecuados que transmitan los necesarios indicadores de escasez.

Un mercado libre, por ejemplo, sirve de mecanismo para comunicar información sobre la escasez. El precio de un artículo sube en la medida en que éste escasea. En un sistema de mercados, un recurso que es caro, por escaso, será tratado como corresponde por el agricultor-empresario.

Pero los mercados no funcionarán con la debida eficacia, mientras no se puedan determinar los derechos claros de propiedad sobre los recursos que intervengan. Esto resulta más fácil hacerlo para la tierra que para el agua o para los recursos genéticos; en parte, porque la tierra puede ser parcelada e identificada sin dificultad; además, permanece en su sitio. Prueba de ello es que los mercados de fincas rústicas operan en muchas regiones del mundo. Cuando se vende la tierra, el propietario obtiene los beneficios en un mejor precio de venta, si la explotación ha sido bien llevada, o los pierde en forma de un precio de venta inferior, cuando ha habido peor gestión. El mercado refleja la escasez de tierra e incentiva al agricultor a adoptar técnicas que la conserven.

Mucho más difícil resulta establecer mercados de agua y de diversidad genética. El agua es un recurso huidizo que se mueve a lo largo y ancho de cientos o miles de kilómetros. En razón de su movilidad, puede usarse repetidamente por diferentes individuos o entidades, ninguno de los cuales ostenta derechos exclusivos sobre ella.

Como la esencia de un derecho de propiedad es el uso exclusivo, los mercados de agua se encuentran poco desarrollados. La mayor parte del agua de riego de nuestro planeta, tanto en los países desarrollados como en los rezagados, se distribuye por instituciones administradas con fondos públicos. Dado que esta distribución está subvencionada, el precio que los agricultores pagan por el agua (en el caso de que tengan que hacerlo) es mucho menor que su valor real, considerando su escasez social.

Esto supone un fracaso señalado. Una de sus consecuencias es que los agricultores tienen poco interés en adoptar técnicas economizadoras cuya instalación les cuesta, a menudo, más que lo que ahorran (que es artificialmente bajo). Esta situación está cambiando en algunas regiones. En el oeste norteamericano se han implantado mercados de agua en los que las partes interesadas, incluyendo usuarios y municipios, pujan por derechos sobre el agua. Por lo general, en aquellas áreas donde operan estos mercados el precio del agua ha subido, prueba de que el sistema proporciona una información más exacta sobre su escasez.

Persiste, sin embargo, la otra cara del problema. Los subsidios empleados en el consumo de agua están enraizados en largas tradiciones sociales y políticas, y su eliminación encontraría dura resistencia. Se haría un flaco favor si unas políticas dirigidas hacia el ahorro de agua provocaran disturbios sociales. Los poderes públicos tienen ante sí el reto de diseñar políticas que contengan el mensaje necesario, sin promover índices inaceptables de conflictividad.

Si la noción de mercado del agua es problemática, lo es todavía más la idea de diversidad genética. ¿Quién posee la diversidad? ¿Cómo puede comprarse y venderse? Pero en este caso se dispone de posibilidades alternativas que imitan, quizá, la función desempeñada por los mercados. Hay millones de personas por el mundo que ponen un alto precio a las pluviselvas tropicales, donde se encuentra una rica diversidad genética. Esas personas podrían formar sociedades que compensaran económicamente a los propietarios por proteger tales bosques. Esta idea encuentra obstáculos enormes, aunque ya se ha hecho algo al respecto, en una propuesta que contempla la reducción de la deuda de los países en vías de desarrollo mediante convenios que protejan el bosque tropical.

Los ejemplos del agua y la diversidad genética indican que es posible impulsar mecanismos que operen como mercados, incluso en áreas donde la implantación de éstos aparezca como intrínsecamente inaceptable. Pero los mercados tienen sus límites. La dificultad de establecer derechos de propiedad respecto de los recursos naturales ha obligado a su control, por el cual las autoridades fijan unos límites contra todo lo que implique amenaza para el ambiente. El ejemplo agrario más claro lo encontramos en la reglamentación de la producción y uso de pesticidas, que obliga a fabricantes y agricultores a dar más importancia a un entorno libre de contaminación por pesticidas de



7. NUEVAS VARIEDADES DE ARROZ se cultivan en las laderas de las colinas de Filipinas, cerca del Instituto Internacional de Investigaciones del Arroz (IIIA) en Los Baños. El empleo de variedades seleccionadas, resistentes a las plagas, ha aumentado el rendimiento de los cultivos arroceros.

la que le concederían si no existiera legislación alguna.

En el caso de que no se puedan crear mecanismos de mercado que funcionen sobre una base económica, las medidas reglamentarias se convierten en un instrumento necesario de la política social. Ahora bien, las reglamentaciones tienen un componente de elevado coste social, ya que se exige que la gente actúe en contra de sus propios intereses económicos. Eso es verdad por definición; no se precisan normas para conseguir que la gente actúe en pro de su beneficio propio. En virtud de ello justamente, las leyes originan conflictos políticos y han de llevarse a la práctica mediante un sistema administrativo riguroso. Si los dos intereses que entran en colisión (el de la sociedad por proteger el ambiente y el propio del agricultor) son elevados, como ocurre con el uso de pesticidas, los costes sociales de una reglamentación pueden ser también altos.

Desde nuestro punto de vista, el mecanismo más viable a largo plazo deberá atender los intereses sociales e individuales, sin obstinarse en imponer unos sobre otros. Se trata de un problema institucional más que técnico. Y se carece de formas de comunicación que conecten el amplio rango de interés de una sociedad hacia una agricultura viable con el bienestar del campesino. En concreto, se deben diseñar mecanismos institucionales que señalen con nitidez el nivel de escasez que la sociedad padezca en suelo cultivable, agua y diversidad genética. Encontrar estos mecanismos constituye el reto político más importante para el desarrollo de la agricultura mundial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AGRICULTURAL RESEARCH AND THIRD WORLD FOOD PRODUCTION. Donald L. Plucknett y Nigel J. H. Smith en *Science*, vol. 217, n.º 4556, págs. 215-220; 16 de julio de 1982.

MICROCLIMATE: THE BIOLOGICAL ENVIRONMENT, segunda edición. Norman J. Rosenberg, Blaine L. Blad y Shashi B. Verma. John Wiley & Sons, 1983.

AGRICULTURAL DEVELOPMENT—LOOKING TO THE FUTURE. P. Crosson en *Sustainable Development of the Biosphere*. Dirigido por William C. Clark y R. E. Munn. Cambridge University Press, 1986.

EFFECT OF SOIL EROSION ON CROP PRODUCTIVITY. Rattan Lal en *CRC Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 5, n.º 4, págs. 303-367; 1987.

THE PROBLEM OF SALT IN AGRICULTURE. James D. Rhoades en *1988 Yearbook of Science and the Future*. Encyclopaedia Britannica, Inc., 1987.

Estrategias para el uso de la energía

El aprovechamiento eficaz de la energía reconcilia la preocupación por el entorno con el desarrollo. El ahorro alarga la existencia de los recursos, decelera los cambios y proporciona el tiempo necesario para explotar fuentes alternativas

John H. Gibbons, Peter D. Blair y Holly L. Gwin

La energía alimenta la actividad humana. Guisa nuestra comida, pone en marcha nuestros sistemas de transporte, calienta y enfría nuestros edificios y hace funcionar nuestras industrias. La energía ayuda a mantener una forma de vida con salud, empleos bien retribuidos y tiempo libre. El nivel de vida que disfrutan Estados Unidos, Japón, Alemania occidental y otros países industrializados se debe, en gran parte, a su acceso a la energía: un quinto de la población mundial consume más del 70 por ciento de la energía comercial mundial. A pesar de ello, la intensidad energética del mundo industrializado —la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de producto nacional bruto— se redujo en un 20 por ciento entre 1973 y 1985. En los Estados Unidos, el producto nacional bruto aumentó un 40 por ciento, en tanto que el consumo de energía permaneció constante.

El crecimiento más rápido en el consumo de energía se registra actualmente en los países en vías de desarrollo. Cuando las naciones menos desarrolladas —como China, México o India— se esfuerzan por industrializarse, elevar su nivel de vida y atender las necesidades de una población en aumento, su consumo de energía crece. Entre los años 1980 y 1985, la población de los países menos desarrollados aumentó en un 11 por ciento y el consumo energético creció en un 22 por ciento; las cifras correspondientes para el mundo industrializado fueron 3 y 5 por ciento. Aun así, el consumo de energía per cápita en los países retrasados es entre cuatro y siete veces menor que el de los países industrializados.

La demanda mundial de energía ha aumentado al tiempo que hemos tomado conciencia de que su utilización constituye una amenaza para el medio ambiente. La combustión de carbón y petróleo produce lluvia ácida, que perjudica los lagos, bosques, estructuras y cosechas de Europa y Norteamérica. Los productos de la fisión nuclear producen residuos radiactivos de vida larga. Los automóviles llenan el aire de humos que amenazan la salud y las propiedades en todo el mundo industrializado. El consumo de energía arroja más de cinco mil millones de toneladas de carbono a la atmósfera cada año. La acumulación resultante de dióxido de carbono, junto con otros gases de invernadero, podría calentar la temperatura del planeta en varios grados a mediados del siglo próximo, alterando el clima de la Tierra a un ritmo entre 10 y 100 veces mayor que el de los cambios climáticos que tuvieron lugar a finales de la última era glacial.

Diríase que asistimos a la representación de un viejo mito. Prometeo robó el fuego y para reparar la ofensa fue encadenado a una roca, azotado por el mar y quemado por el sol. Nosotros hemos capturado la energía de los combustibles fósiles y nuestro castigo es la pérdida de la salud personal y ambiental.

Pero nosotros podemos cambiar el relato. Los avances tecnológicos pueden rebajar considerablemente la cantidad de energía necesaria para proporcionar un determinado nivel de bienes y servicios, mitigando al mismo tiempo los problemas derivados del consumo energético. Las inversiones destinadas a mejorar el rendimiento energético pueden ayudarnos a reducir la demanda de combustibles fósiles sin renunciar al crecimiento económico. La aplicación de las técnicas actuales para mejorar el rendimiento puede ahorrar inversiones de capital, ganar tiempo para el desarrollo de nuevas técnicas de suministro y posibilitar, en definitiva, un crecimiento de bienes y servicios con un consumo estable de energía. En el estudio que sigue abordaremos las posibilidades de los nuevos recursos energéticos y de un mejor aprovechamiento de los mismos. Y pondremos en ese mayor aprovechamiento nuestra más sólida esperanza.

La humanidad consume, en un solo año, la cantidad de combustibles fósiles que a la naturaleza le ha costado un millón de años producir. El consumo de energía global ha aumentado desde 21 hexajoule en 1900 hasta 318 hexajoule en 1988. (Un hexajoule equivale a 10^{18} joule, es decir, el calor que se desprendería al quemar unos 170 millones de barriles de petróleo.) El carbón, el petróleo y el gas natural proporcionan el 88 por ciento de nuestro consumo total de energía; la energía nuclear, la mayor parte del resto. Los países menos desarrollados todavía dependen poderosamente de otros com-

JOHN H. GIBBONS, PETER D. BLAIR y HOLLY L. GWIN ponderan las diferentes opciones de política energética en la Oficina de Valoración de la Técnica, del Congreso estadounidense. Gibbons ha sido su director durante los últimos diez años. Estudió en la Universidad de Duke, donde se doctoró en física nuclear. Gibbons se incorporó en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge en 1954 y dirigió más tarde su programa del medio ambiente. Blair está al frente del programa de energía y materiales en esa oficina gubernamental. Recibió el título de doctor en política energética por la Universidad de Pennsylvania, donde ocupa plaza de profesor. Gwin, que estudió derecho en la Universidad de Tennessee, es consejero general de la agencia federal.



1. EJEMPLO DE EDIFICIO que aprovecha al máximo la energía necesaria es este banco de St. Cloud. La construcción y las técnicas economizadoras incorporadas en el transporte y en la industria ayudan a proporcionar diferentes servicios con un menor daño para el medio. Las ventanas aislantes de este edificio ahorraron unos 59.000 dólares en calefacción. Un revestimiento de baja emisividad impide que el calor se pierda a través de los cristales.

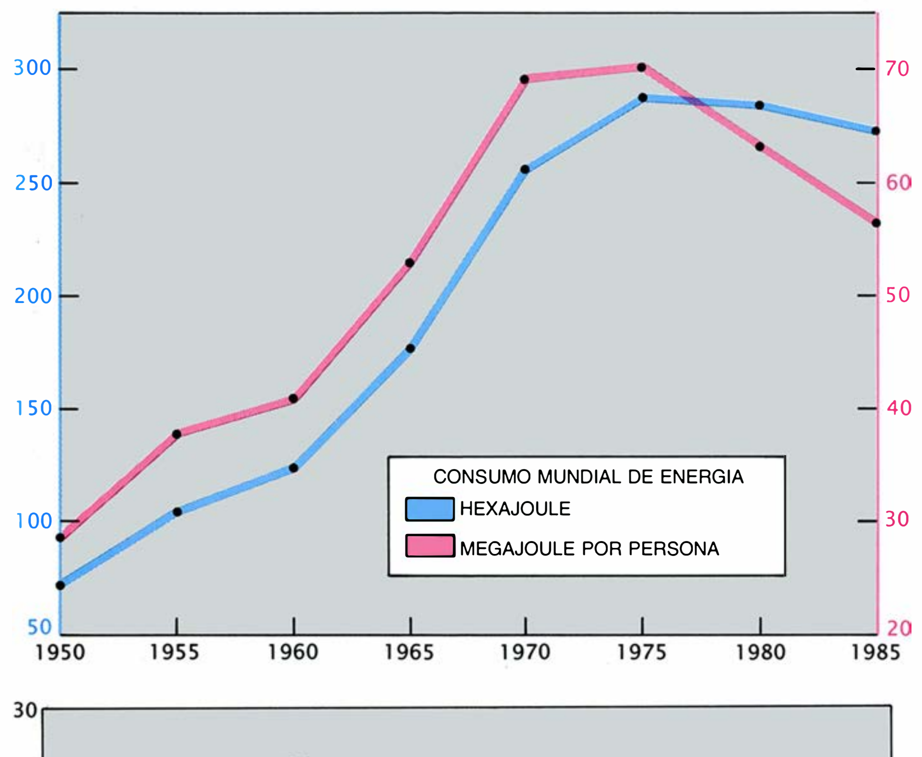
bustibles no comerciales: madera, estiércol y residuos de las cosechas; pero, a medida que sus economías progresan, aumenta su consumo de combustibles fósiles en el comercio y la industria.

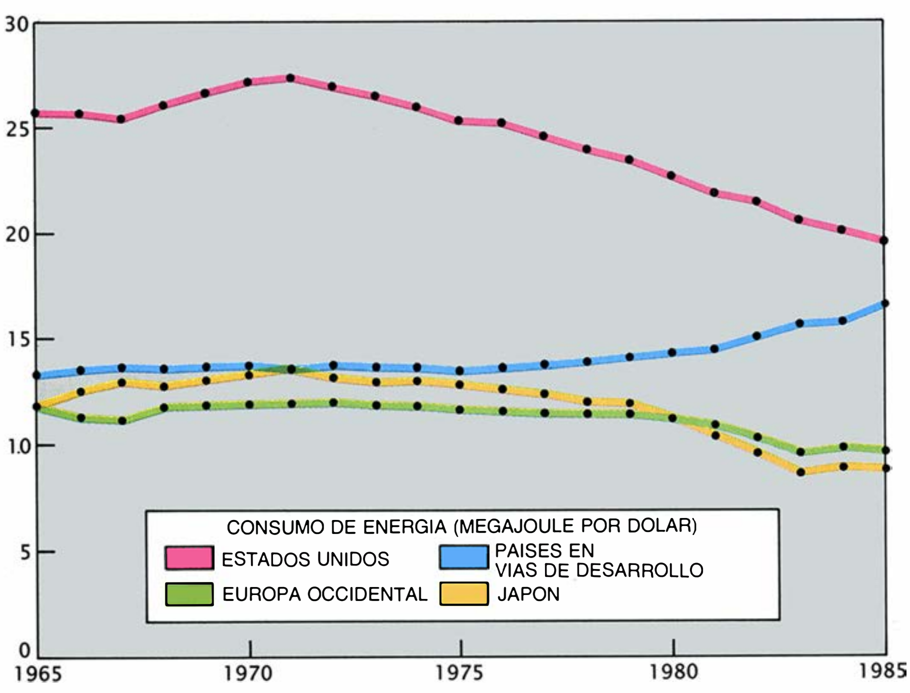
El combustible predominante en el mercado de la energía es el petróleo, que proporciona el 38 por ciento del consumo energético comercial. La Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) controla las tres cuartas partes de las reservas de crudo conocidas, incluidos todos los descubrimientos más recientes. Las estimaciones de las reservas de petróleo se han corregido recientemente a la baja en las naciones no pertenecientes a la OPEP, la Unión Soviética entre ellas, que consume un 15 por ciento del petróleo mundial y que ha ido incrementando durante estos últimos años sus tasas de produccción.

La dependencia del petróleo procedente del Oriente Medio constituye un motivo de tensión para las economías tanto de los países industrializados como de los retrasados. Los gastos de importación de petróleo han frenado los esfuerzos empeñados por los países en vías de desarrollo en conseguir divisas fuertes con las que pagar sus deudas. En 1987, los Estados Unidos importaron petróleo por un valor de 40.000 millones de dólares, una cantidad igual a la tercera parte del déficit comercial de este país. Durante ese mismo año, el Pentágono gastó 15.000 millones de dólares para proteger los suministros de petróleo. A medida que la Unión Soviética, los Estados Unidos y otros países al margen de la OPEP vayan agotando sus reservas, la geopolítica de la energía se irá desplazando nuevamente hacia Oriente Medio.

El gas natural proporciona una quinta parte de la energía comercial. Es un combustible limpio, eficiente y de suficiente flexibilidad para su empleo en la industria, el transporte y la producción de energía eléctrica. El gas natural emite menos contaminantes que los demás combustibles fósiles y menos dióxido de carbono: con la combustión de gas natural se desprenden 14 kilogramos de dióxido de carbono por cada mil millones de joule, mientras que el petróleo y el carbón generan 20 y 24 kilogramos, respectivamente. Los expertos de la industria confían en que las fuentes tradicionales de gas natural durarán cuatro o cinco décadas más y muchos servicios públicos consideran al gas natural el mejor sustituto del petróleo en cuanto combustible de las centrales de producción de energía eléctrica. Sin embargo, las reservas conocidas de gas natural están controladas también por unos pocos países. Oriente Medio y la Unión Soviética poseen un 70 por ciento de dichas reservas. Con el agotamiento de las reservas conocidas y el aumento consiguiente de los costes, la explotación de grandes reservas de gas "no convencional", tal como el que emana en las minas de carbón, más uniformemente distribuidas, puede resultar rentable.

Las reservas mundiales de carbón totalizan unos 950.000 millones de toneladas métricas; aproximadamente la mitad de ellas son de alta calidad. Estas reservas podrían durar más de 275 años al ritmo de producción actual. Los Estados Unidos y la Unión Soviética controlan, cada uno, la cuarta parte de las reservas totales de carbón; el resto se distribuye entre Africa, Australia, Europa y Asia (principalmente China).

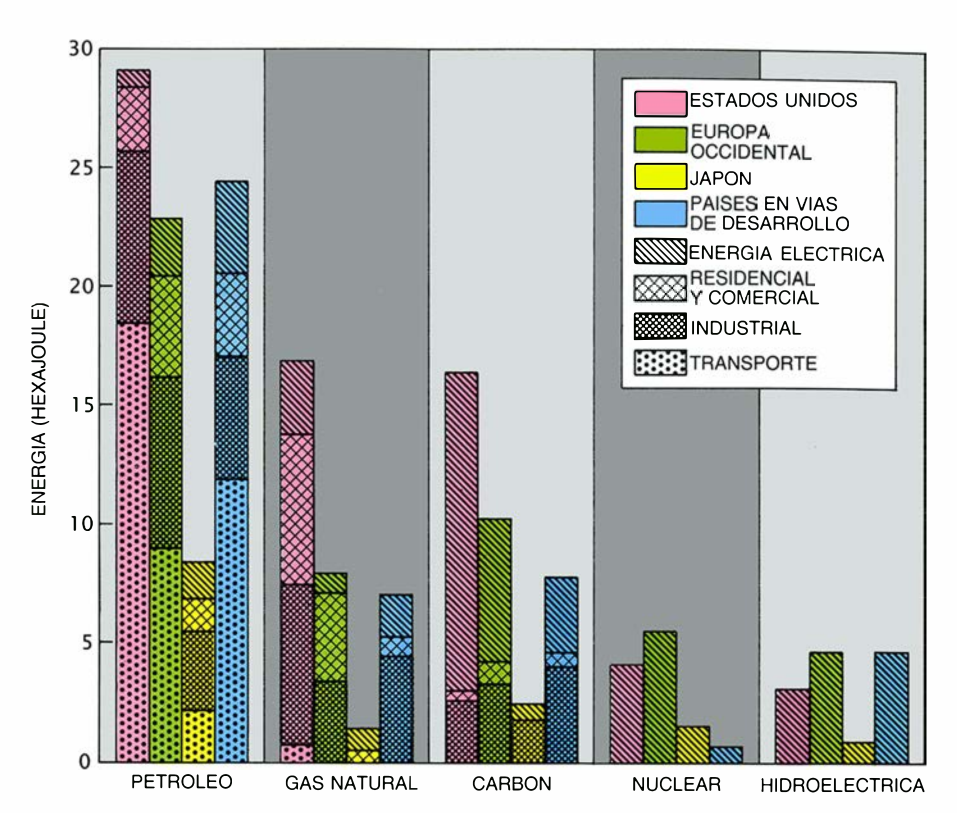




2. CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA (*parte superior*) representado entre los años 1950 y 1985 (*azul*). La línea de color rojo muestra el consumo mundial de energía per cápita. La intensidad energética —consumo de energía dividido por el producto nacional bruto— se ilustra en el esquema inferior en dólares de 1985 para diferentes regiones del mundo. En los países retrasados, el aumento de la intensidad energética puede atribuirse al crecimiento de la población y de la actividad económica. Aunque EE.UU. ha reducido su intensidad al crecer sin consumir más energía, se hallan por encima de Europa y Japón.

Los países industrializados cubren entre el 20 y el 30 por ciento de la energía que consumen con el carbón. China satisface casi las tres cuartas partes de sus necesidades energéticas con este combustible.

El carbón es un combustible sucio: su extracción puede arrasar la orografía y su combustión produce grandes cantidades de dióxido de carbono y otros contaminantes. Las amenazas ambientales podrían limitar el consumo de carbón en todo el mundo, a menos que el desarrollo de nuevas técnicas permitan quemarlo de forma más eficiente o convertirlo en otros combustibles alternativos. Los precipitadores y depuradores, dispositivos capaces de filtrar algunos de los contaminantes, quizá no alcancen a cumplir este cometido. A lo largo de la última década, los ingenieros han desarrollado algunas técnicas de "carbón limpio", tales como un generador eléctrico que primero transforma el carbón en gas natural y a continuación quema este gas para mover una turbina. Estas tecnologías resultan muy prometedoras para la reducción de la mayoría de los contaminantes que produce la combustión del carbón, pero no disminuirán la emisión de dióxido de carbono. La dependencia del carbón requerirá el desarrollo de técnicas capaces de eliminar la emisión de dióxido de carbono, a costa seguramente de un menor rendimiento.



3. VARIACION DE LOS HABITOS ENERGETICOS de una nación a otra. Los combustibles fósiles constituyen el suministro predominante de energía. El petróleo que consume el sistema de transportes de los Estados Unidos bastaría por sí solo para satisfacer toda la demanda energética del Japón. Los países en vías de desarrollo dedican la mayor parte de la energía que consumen al sector de la industria.

Las amenazas del medio ambiente, geopolíticas y económicas que gravan la utilización de los combustibles fósiles favorecen la búsqueda de energías alternativas. Las preferencias de muchos planificadores se inclinan hacia la energía nuclear, que hoy en día genera el 17 por ciento de la electricidad que se consume en el mundo, porque su uso no produce emisión de dióxido de carbono y otros contaminantes que originan la lluvia ácida. Sin embargo, la construcción y el funcionamiento de los reactores de agua ligera (el modelo más extendido) es cada día más caro. Francia obtiene un 70 por ciento de la electricidad que consume de la energía nuclear, pero los accidentes de Three Mile Island (Estados Unidos) y Chernobyl (Unión Soviética) han minado la confianza del público sobre la seguridad y fiabilidad de estos reactores. Un sector amplio de ciudadanos duda de que existan técnicas adecuadas para la manipulación de sustancias radiactivas e incluso de la creación de dichas técnicas, lo mismo que es reacio a admitir que se haya encontrado un remedio para evitar la proliferación de materiales relacionados con los armamentos nucleares. Por culpa de esos inconvenientes y del atractivo que presentan otras fuentes de energía, en los Estados Unidos no se ha construido ninguna planta nuclear nueva desde 1978.

El diseño de reactores avanzados podría contribuir a restablecer la confianza en la energía nuclear. La construcción de reactores "estables pasivamente" evitaría la aparición de reacciones en cadena sin necesidad de recurrir a un sistema de control externo. La introducción de diseños normalizados permitiría reducir los costes de construcción, agilizar la homologación y alargar la vida en servicio de estas centrales. Y quizá lo más importante, el desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de residuos radiactivos se convertía en factor crucial para ganar la aceptación del público en favor de la energía nuclear.

La posibilidad de obtener energía a partir de la fusión de núcleos ligeros es una esperanza prometedora para las generaciones futuras. El proceso de fusión cuenta con las ventajas que ofrece el suministro de un combustible inagotable (deuterio) y unos residuos radiactivos que no presentan tantos problemas como los otros, amén de soslayar muchas de las frustraciones y limitaciones que caracterizan a la fisión nuclear. Sin embargo, el completo desarrollo y la comercialización de la energía de fusión requerirá todavía miles de millones de dólares y es probable que se demore algunas décadas. Tamaño esfuerzo pone de manifiesto la necesidad, no sólo de grandes inversiones estatales, sino también de una amplia cooperación internacional. En cualquier caso, son pocas las técnicas cuyos beneficios respecto a las inversiones necesarias sean más prometedores que en este ejemplo.

Los mercados de la energía solar siguen en expansión y, al contrario de lo que sucede con la nuclear, el precio de la energía solar continúa descendiendo. La electricidad producida con células fotovoltaicas, que convierten directamente luz solar en energía eléctrica, cuesta actualmente unas 40 pesetas por kilowatt-hora y ya es de uso habitual en calculadoras, relojes y satélites artificiales. Aunque todas estas aplicaciones a pequeña escala ayudan a mantener una industria en tanto se desarrolla la oportuna tecnología, las células fotovoltaicas resultan todavía más caras que el resto de los generadores habituales de energía para la mayoría de las aplicaciones. Los avances futuros en microelectrónica y semiconductores

mejorarán el rendimiento de estos dispositivos y abaratarán sus costes.

La generación de energía solar ocurre a mayor escala en las plantas que convierten energía solar en calor. En estas centrales térmico-solares, un conjunto de espejos o lentes focaliza los rayos del sol sobre un receptor que contiene un fluido que conduce el calor hasta un generador eléctrico ordinario. A modo de ejemplo, en febrero de este año, una compañía inauguró en California una planta térmica solar que se espera que produzca energía eléctrica a un coste inferior a las diez pesetas por kilowatt-hora. (Con los precios actuales de los combustibles fósiles en Estados Unidos, las turbinas de combustión producen electricidad a unas cuatro pesetas por kilowatt-hora.) La investigación sobre espejos más avanzados y ligeros y la utilización de nuevos y mejores fluidos de transporte, tales como sales fundidas, pueden mejorar estos resultados.

Las técnicas solares no han alcanzado un grado de desarrollo suficiente para suministrar electricidad de forma masiva y continua, pero podrían contribuir al suministro de energía durante las horas de mayor consumo en zonas de insolación considerable y donde no suele faltar. Las centrales solares se pueden utilizar también formando parte de los sistemas de almacenamiento por bombeo, en los que unas bombas alimentadas por energía solar elevan agua hasta un estanque artificial que, luego, alimenta a unos generadores hidroeléctricos. La energía solar puede constituir asimismo la compañía natural de otros tipos de almacenamiento de energía: aire comprimido, baterías o (quizás) anillos superconductores de almacenamiento de corriente eléctrica.

Los costes económicos y ambientales de la energía hidroeléctrica, una tecnología ya madura, son muy elevados: la construcción de nuevas presas trae frecuentemente consigo la destrucción de tierras de labor y el trasiego de poblaciones. Aunque los lugares adecuados para construir nuevas instalaciones de este tipo en el mundo industrializado son muy limitados, las centrales hidroeléctricas de menor tamaño pueden revelarse como valiosas fuentes de energía en los países en vías de desarrollo.

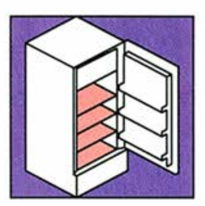
La biomasa, consistente en madera y residuos orgánicos, proporciona energía en muchas partes del mundo. La conversión de la biomasa en productos más útiles, tales como el metano o los combustibles alcohólicos utilizados en los medios de transporte, aumentará notablemente el valor de esta fuente de energía. Las plantas de producción de energía eléctrica alimentadas por los residuos sólidos urbanos pueden llegar a ser una fuente de energía modesta pero económicamente rentable a medida que empeoren los problemas de eliminación de basuras, siempre que se perfeccionen los métodos para separar los materiales combustibles y no combustibles y controlar las emisiones de



4. GENERACION DE ELECTRICIDAD en centrales alimentadas con petróleo, carbón o gas natural. (La central de la fotografía consume carbón y se halla instalada en San Juan, Nuevo México.) Tal generación eléctrica es responsable del 23 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono originadas por la producción de energía, así como de los contaminantes que dan lugar a lluvia ácida. Aunque existen dispositivos de control de las emisiones capaces de eliminar dichos contaminantes, no existe ningún método eficaz para capturar el CO_2. Muchos expertos se inclinan por la energía nuclear.

POSIBILIDADES DE MEJOR RENDIMIENTO







	AUTOMOVIL LITROS CADA 100 KILOMETROS	**VIVIENDA** MILES DE JOULE POR METRO CUADRADO	**FRIGORIFICO** KILOWATT-HORA POR DIA	**HORNO** DE GAS. MILLONES DE JOULE POR DIA	**ACONDICIONADOR DE AIRE** KILOWATT-HORA POR DIA
MODELO MEDIO	13	190	4	210	10
NUEVO MODELO MEDIO	9	110	3	180	7
MEJOR MODELO	5	68	2	140	5
MEJOR PROTOTIPO	3	11	1	110	3

los gases de la combustión. La emisión de dióxido de carbono en la combustión de biomasa se compensa plantando nuevas plantas o árboles, es decir, renovando los "sumideros de carbono" que proporcionaban originalmente estos elementos.

Algunos expertos en planificación energética consideran el viento una fuente de energía muy prometedora. Suecia tiene sobre el tapete la sustitución de sus reactores nucleares por turbinas de viento cimentadas en el fondo marino. Sin embargo, para que la energía eléctrica producida por el viento constituya una fuente de energía de valor práctico es necesario crear sistemas capaces de funcionar adecuadamente con las velocidades variables de los rotores.

La producción geotérmica de energía, que es la extracción de calor de las masas de rocas calientes existentes en el subsuelo, y la conversión de energía térmica del océano, que explota la diferencia de temperaturas que existe entre la superficie cálida de las aguas y sus frías profundidades, pueden también contribuir a proporcionar cantidades sustanciales de energía en determinadas regiones. Por ejemplo, en el norte de California se han obtenido más de 2000 megawatt de energía geotérmica. En las próximas décadas, es posible que en algunas zonas del mundo se desarrollen muchas aplicaciones de la energía geotérmica a bajas temperaturas (verbigracia, para calentar invernaderos).

La conjunción del embargo de petróleo árabe con la huelga de los mineros del carbón estadounidenses en 1973 hizo aumentar la preocupación por la escasez inmediata de los suministros de energía y su agotamiento final. Los analistas de entonces, en concordancia con su época, predijeron dos cosas. En primer lugar, que la elevada tasa de crecimiento en la demanda de energía mundial continuaría, dado que el consumo energético de un país se halla indisolublemente ligado a su desarrollo económico. En segundo lugar, un aumento continuado del consumo de energía tendría consecuencias desastrosas.

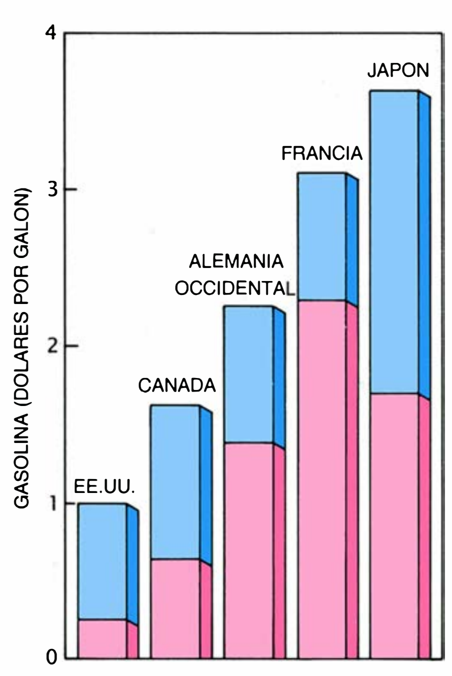
Hasta ahora no se ha cumplido ninguna de estas dos previsiones; en parte, debido a que la subida del precio de la energía ha producido un aumento en la cantidad de recursos existentes, pero, sobre todo, debido al inesperado auge de tecnologías encaminadas al aprovechamiento eficaz de la energía. Las posibilidades más prometedoras, tanto para los países industrializados como para los poco desarrollados, de ver crecer su expansión económica sin los costes que supone la utilización de combustibles fósiles se encuentran en el término de la demanda en la ecuación de la energía. Las mejoras en el rendimiento energético se pueden llevar a cabo con un coste económico mucho menor que el necesario para desarrollar nuevas fuentes de energía.

El sector de la construcción presenta muchas posibilidades de mejorar el rendimiento energético. En 1985, los edificios de los países industrializados consumieron 37 hexajoule, una cifra casi igual a la producción de la OPEP. La utilización de nuevos hornos de condensación podría hacer descender sensiblemente esta demanda. Dado que tales hornos reabsorben gran parte del calor que se pierde con los gases desprendidos en la combustión, el consumo de combustible se reduce en un 28 por ciento; además, la emisión de gases contaminantes a la atmósfera es menor que en el caso de los hornos convencionales. Los sistemas de control de los ambientes interiores pueden regular las temperaturas externas e internas, la luz solar y la presencia de personas y, de este modo, proporcionar la luz y el aire acondicionado allí donde se necesiten. Estos sistemas permiten ahorrar entre un 10 y un 20 por ciento de energía. Una combinación de lámparas especiales, reflectores y luz del día reducen el consumo de energía en iluminación al menos en un 75 por ciento.

El empleo de materiales de construcción avanzados puede frenar considerablemente la pérdida de calor a través de las ventanas, puertas y paredes. En las viviendas "superaisladas", en las que se dobla el aislamiento normal y un revestimiento hermético cierra las paredes, el calor radiado por las personas, la luz, los hornos y otros electrodomésticos pueden calentar por sí solos toda la casa. En comparación con las viviendas medias que se construyen en los Estados Unidos, algunas viviendas superaisladas de Minnesota necesitan un 68 por ciento menos de energía calorífica; en algunas residencias de Suecia, el ahorro llega hasta el 89 %.

En la industria, la utilización de sensores y controles, sistemas avanzados de recuperación de calor y técnicas para reducir la fricción economizan energía. Una de las apuestas más seguras para mejorar el rendimiento es la cogeneración, que consiste en la producción combinada de calor y electricidad. Sólo la tercera parte de la energía del vapor producido en la caldera de una central térmica convencional se convierte en electricidad; en una central en la que se emplee la cogeneración, la mayor parte de la energía restante contenida en el vapor sirve de fuente de calor para otros procesos industriales.

Otras medidas que favorecen un mayor aprovechamiento son específicas de



5. PRECIOS DE LA GASOLINA en los Estados Unidos. No reflejan los costes totales que supone la protección de los suministros de petróleo y la protección del medio. Otros países gravan el carburante con impuestos muy altos (*rojo*), lo cual fuerza a los consumidores a considerar las consecuencias, sobre el entorno global, de sus hábitos energéticos. (Un galón equivale a 3,785 litros.)

los distintos ramos industriales. En el sector papelero, el control automatizado del proceso, el aumento de la velocidad del procesado y la utilización de rodillos de alta presión incrementan, y mucho, el rendimiento. Los procesos avanzados en la industria del acero permiten ahorrar al menos un 40 por ciento de energía en las plantas de los Estados Unidos. En los países en vías de desarrollo, la eficiencia podría potenciarse todavía más: la energía necesaria para obtener una tonelada de acero es cuatro veces mayor en China e India que en Japón.

Desde el punto de vista del ahorro energético, resultan muy prometedoras las nuevas técnicas introducidas en el campo de los generadores de electricidad. La combustión en lechos fluidizados, en la que el carbón que se quema está suspendido (fluidizado) en una corriente de aire, aumenta el rendimiento y reduce la emisión de contaminantes. Algunos analistas creen que la opción más prometedora en un futuro para la generación de energía eléctrica estriba en el empleo de la turbina aeroderivativa, que está basada en el diseño de los motores a reacción y quema gas natural. Con algunas mejoras adicionales, esta técnica podría incrementar la eficiencia de conversión desde su valor actual, 33 por ciento, hasta más del 45 por ciento.

El principal destino de las reservas mundiales de petróleo, y el de demanda más creciente, es el transporte, lo mismo en los países industrializados que en los menos desarrollados; representa, además, una grave amenaza para el medio ambiente. En los Estados Unidos, los automóviles y camiones ligeros consumen, de cada tres barriles de petróleo, más de uno, y contribuyen en un 15 por ciento a las emisiones de dióxido de carbono. Durante los últimos 15 años, los nuevos automóviles y camiones aprovechan mucho mejor el combustible gracias al empleo de materiales más ligeros, adopción de los neumáticos radiales —que reducen la resistencia a la rodadura— y los nuevos diseños de las carrocerías con bajo perfil aerodinámico, entre otras estrategias. Rendimiento que mejoraría todavía con nuevas técnicas, verbigracia, transmisiones variables continuas y motores diésel de inyección directa.

Desde el punto de vista de la capacidad técnica, los automóviles podrían rebajar el consumo de carburante hasta los 4 litros cada 100 kilómetros. Si el precio de la gasolina aumentara en los Estados Unidos hasta el punto de reflejar sus costes reales —económicos, medioambientales y geopolíticos— como sucede en otros países, los usuarios exigirían coches más eficientes en el consumo de combustible, y las normativas para aumentar la eficiencia adquirirían su verdadero sentido. Incluso en las condiciones actuales, la economía de combustible en los nuevos vehículos podría aumentar hasta llegar a un consumo de 7,5 litros cada 100 kilómetros sirviéndose de la técnica existente con un coste mínimo para los consumidores. Sin embargo, los fabricantes se resisten a dar estos pasos, temiendo el rechazo de los usuarios, que, en muchos casos, relacionan el consumo elevado con una mayor potencia. Por otra parte, el ahorro de combustible de los nuevos automóviles podría aumentar desde sus valores actuales de unos 11 litros cada 100 kilómetros hasta los 6,5 litros, mejorando las técnicas con un coste igual al valor de la gasolina que se ahorraría a lo largo de toda la vida útil del automóvil, calculada al precio medio actual de unas 35 pesetas el litro.

El transporte, las comunicaciones, la industria y, en general, todo lo que asociamos con el desarrollo económico y un alto nivel de vida suponen un consumo de energía. Sin embargo, existen muchas técnicas para atender a todas estas necesidades con mucho menos combustible que el empleado corrientemente. La planificación de las futuras necesidades energéticas y la decisión del capital a invertir en nuevos suministros o en técnicas para aprovechar mejor la energía exige un análisis serio de lo que podemos o queremos conseguir. En ese contexto, la reducción del consumo de petróleo en los Estados Unidos contribuiría a proteger significativamente su economía y a aumentar la estabilidad geopolítica en todo el mundo.

En cualquier caso, las mejoras espectaculares en el aprovechamiento de la energía no bastarán para proteger el medio ambiente si son patrimonio exclusivo del mundo industrializado. Las previsiones económicas demuestran que, si no se hace nada para extender los logros de las técnicas relacionadas con la energía al ámbito de los países en vías de desarrollo, los cambios climáticos globales y otros importantes problemas ambientales seguirán empeorando hasta niveles más allá de lo aceptable. Incluso suponiendo que los países industrializados consiguieran reducir a la mitad sus emisiones de dióxido de carbono (evaluadas actualmente en unos 1800 kilogramos por persona y año), es probable que el crecimiento de la población y el desarrollo económico de los países menos desarrollados forzaran un incremento en sus emisiones de dióxido de carbono desde los 450 kilogramos actuales hasta los 900 kilogramos por persona y año en el 2030. En este caso, las emisiones anuales de dióxido de carbono, mundiales, serían 2,5 veces mayores para ese año que en la actualidad.

El mundo industrializado consume una buena porción de la energía comercial, pero tiene en sus manos las herramientas necesarias para mejorar el rendimiento en el consumo y disminuir la utilización de combustibles fósiles. Podría empezarse ya por aplicar las leyes del mercado ("la energía determina el precio de las cosas") al sistema de transporte en los Estados Unidos.

El precio del litro de gasolina ha alcanzado en los Estados Unidos su nivel más bajo de la historia. Este precio no refleja el coste de la defensa del Oriente Medio, la polución ambiental, el calentamiento mundial de la atmósfera o el desequilibrio en la balanza de pagos que originan las importaciones de petróleo. Los precios de la gasolina en Europa y Japón doblan o triplican el norteamericano porque los gobiernos de estos países aplican impuestos que

fuerzan a los consumidores a cargar con los costes globales de su comportamiento. Si los estadounidenses desean reducir el consumo de petróleo y las emisiones de dióxido de carbono y desempeñar un papel de liderazgo mundial, un buen punto de arranque sería comenzar a revisar su política de transporte de forma tal que reflejara la totalidad de los costes relacionados con la energía.

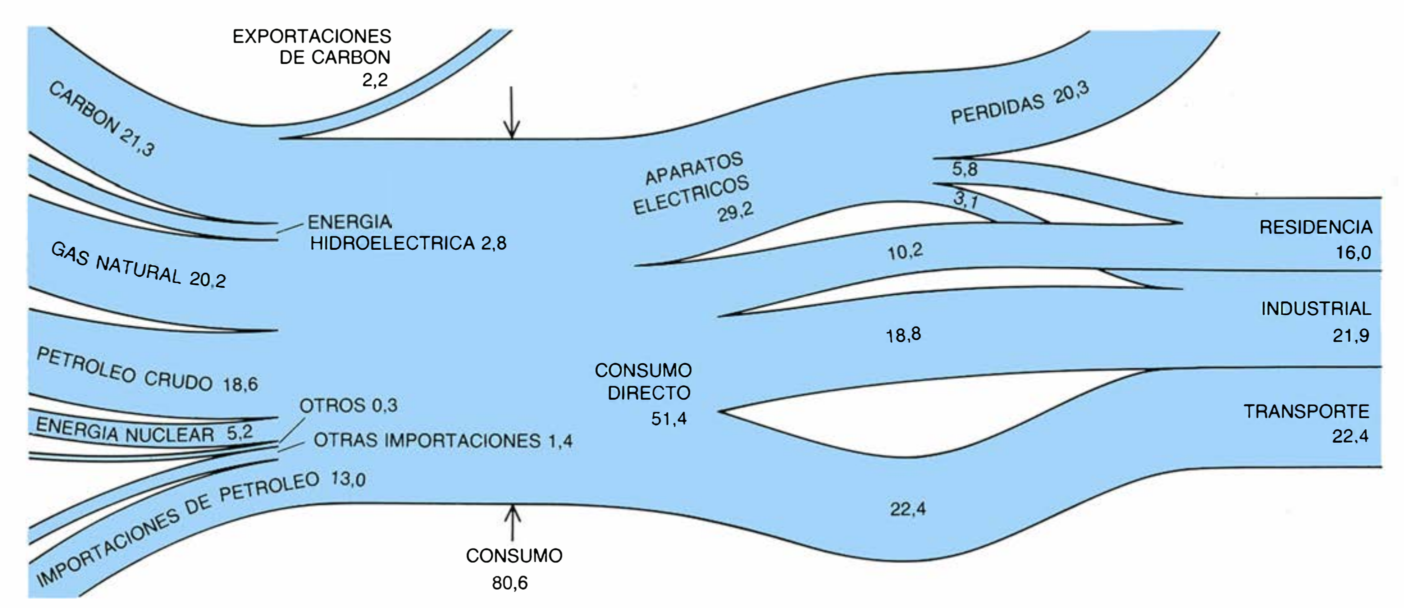
Las estrategias elaboradas para fomentar la penetración en el mercado de las nuevas tecnologías resultan esenciales. En este sentido, las investigaciones llevadas a cabo en el Centro de la Ciencia de las Edificaciones Lawrence Berkeley, en California, han puesto de manifiesto que una inversión de 8 millones de dólares en la construcción e instalación de ventanas de baja emisividad permitiría ahorrar unos 36 millones de barriles de petróleo, cuya producción costaría unos 300 millones de dólares. Los gobiernos pueden llevar a cabo los pasos necesarios para primar las inversiones en técnicas destinadas a mejorar el rendimiento energético con respecto a la producción. El Congreso de los Estados Unidos promulgó recientemente leyes que imponían normas de aprovechamiento mínimo para todos los nuevos electrodomésticos. Esta medida era necesaria porque los fabricantes, que se esfuerzan en minimizar los costes de inversión inicial, no recurrían a las técnicas adecuadas en detrimento de los compradores de los productos, que están más interesados en los costes durante toda la vida útil del aparato.

El éxito de los sistemas de iluminación eficiente, otra fuente importante de ahorro de energía, puede hacer necesaria también una intervención estatal, habida cuenta del vacío legal existente. Una iniciativa prometedora consiste en que las compañías concedan ayudas a los clientes para que éstos reemplacen los sistemas de alumbrado existentes por equipos más eficientes; ambas partes comparten así los beneficios. Por ironía de las cosas, a las mismas compañías que en los años cincuenta regalaban bombillas para suscitar una demanda de electricidad les puede resultar beneficioso ahora regalar bombillas de elevado rendimiento con el fin de reducir la demanda de electricidad en la década de los noventa.

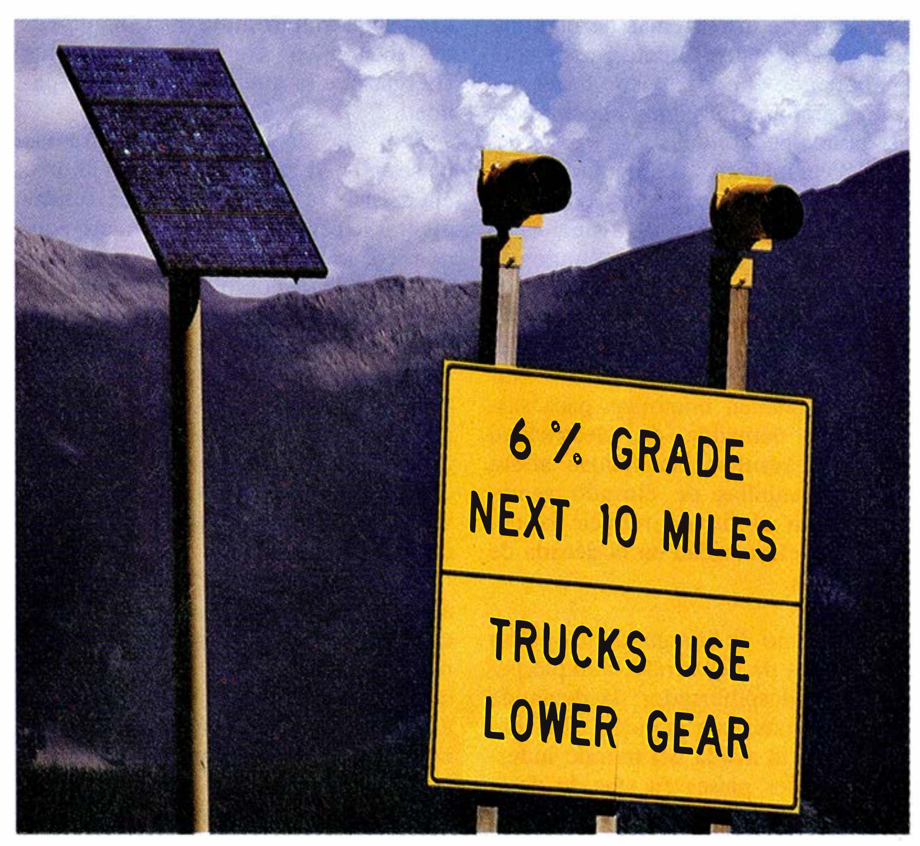
El consumo de energía de los países en vías de desarrollo, aunque pequeño, es despilfarrador; la demanda crece, además, con rapidez. Sin embargo, con la ayuda del mundo industrializado, los países en vías de desarrollo podrían aplicar soluciones técnicas que promovieran su progreso económico manteniendo la demanda de energía relativamente baja. Un importante análisis realizado al respecto demuestra que la utilización de la mejor tecnología de que se dispone en la actualidad podría proporcionar a un país retrasado un nivel de servicios similar al que existía en Europa a mediados de los años setenta con un consumo energético sólo un 20 por ciento superior al que tenían los países en vías de desarrollo en 1980. Este mismo análisis confirma también que los países industrializados podrían continuar su crecimiento económico consumiendo menos energía que la que gastan en la actualidad.

¿Por qué deberían preocuparse los países poco desarrollados por el ahorro energético, cuando su interés fundamental se centra en el crecimiento económico, lo cual trae consigo un incremento en la disponibilidad de energía? La respuesta a esta pregunta se encierra en el rendimiento energético, que reconcilia los objetivos simultáneos del desarrollo y la protección del medio ambiente. La eficiencia ahorra capital y reduce la producción de dióxido de carbono, sulfatos (que ocasionan la lluvia ácida), hidrocarburos y residuos nucleares.

Los países poco desarrollados deben afrontar una difícil elección. El camino que lleva el progreso industrial de China, por citar un caso, podría motivar que su contribución a la acumulación atmosférica de dióxido de carbono fuera mayor que la de cualquier otro país. La situación crítica en que China se ha colocado proviene de su enorme población en crecimiento, su tendencia hacia los procesos de intenso consumo de energía, su despilfarro energético y su exagerada dependencia del carbón. Entre los años 1980 y 1986, el sector industrial de China creció a razón del 12 por ciento anual, más deprisa que en todos los demás países grandes del mundo. La intensidad energética media del sector industrial chino ha decaído un tanto, pero sigue siendo la mayor entre los países en vías de desarrollo. Las posibilidades de mejorar el rendimiento se han convertido en el



6. EL FLUJO DE ENERGIA demuestra que, en el año 1987, los Estados Unidos consumieron 12,2 hexajoule más de los que produjeron. El equilibrio se conseguía gracias a las importaciones de petróleo. Los recursos de energías alternativas cubrieron sólo un 12 % de la producción de energía total.



7. UN SIGNO DE LOS TIEMPOS en una carretera de montaña: los semáforos están alimentados por células fotovoltaicas. El precio de estas células ha caído en picado, con la expansión consiguiente de su mercado. Un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos actuales puede ayudarnos a ganar el tiempo necesario para investigar y desarrollar nuevas técnicas que aumenten la producción de energía.

principal recurso energético de China para el futuro.

Para alcanzar estos objetivos se precisarán importantes transferencias de técnica y capital por parte del mundo industrializado, pero se requerirá también una reforma de la política energética y de precios en China. En este país, el precio del carbón es cuatro veces menor que su valor internacional. Cuenta allí la sabiduría popular que "con una tonelada de carbón no se puede comprar ni siquiera una tonelada de arena; con un barril de petróleo, ni siquiera una botella de licor".

Los países industrializados con una infraestructura vieja tendrán también un relevante peso específico en el consumo energético y las emisiones de carbono del futuro. La intensidad energética en la Unión Soviética dobla la media de los países que pertenecen a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y no muestra signos de mejora. Las nuevas políticas de *perestroika* y *glasnost*, que alientan el rendimiento, los sistemas con mercado orientado y la cooperación global, resultan muy prometedoras para la economía global y el medio ambiente. A medida que la Unión Soviética, China y otras economías de planificación centralizada opten por un sistema de precios más racional, se irán dando cuenta de que los precios del mercado no reflejan todavía algunos importantes costes colaterales. Nuestra percepción de que en estos costes se incluyen graves problemas ambientales de efectos mundiales promoverá que los países industrializados favorezcan (a través de transferencia de tecnologías, subsidios o créditos) las políticas o técnicas capaces de llevar a los países en vías de desarrollo más allá de los niveles de rendimiento que resultarían de la aplicación estricta de los precios del libre mercado. La adopción de estas políticas exigiría unos niveles de cooperación internacional sin precedentes en el pasado.

El capital y el ingenio son el mejor sustituto del consumo de energía en todo el mundo; mas, para alcanzar este objetivo, serán necesarias grandes dosis de avances técnicos, voluntad política, medidas económicas innovadoras y tiempo. Buena parte del refinamiento técnico necesario para garantizar incrementos sustanciales en la eficiencia de la conversión y uso de la energía existe ya, eficiencia que suele resultar barata si se la compara con los costes reales de los combustibles fósiles y los gastos de capital que requieren los nuevos suministros. Para avanzar más allá de los límites actuales, habrá que profundizar en la investigación y desarrollo, con el debido soporte de empresas privadas y gobiernos. Necesitamos también continuar investigando sobre nuevas fuentes de energía, en especial la nuclear y las renovables, con el fin de que puedan complementar y, en última instancia, tomar el relevo de los combustibles fósiles. Mientras eso llega, un mayor aprovechamiento permitirá restringir la demanda de combustibles fósiles, aliviar los problemas ambientales, ahorrar inversiones de capital y, con el tiempo, disponer de un cierto nivel de bienestar con un menor consumo de energía.

La voluntad política constituye otro aspecto de la cuestión. Lo es también la aplicación de doctrinas económicas innovadoras. ¿Quién desea elevar el coste de venta de la gasolina para los pobres, sea en los Estados Unidos o en la India? La razón nos dicta que subvencionar los costes del carburante impone cargas más pesadas para un país que alentar y quizá subvencionar las compras de automóviles o electrodomésticos eficientes; mas, para aplicar una política que nos permita fomentar el rendimiento energético, será necesario entrar en un territorio donde impere una nueva sensibilidad. La voluntad política resultará también decisiva para optar por técnicas de energías alternativas. La mayoría de los científicos creen que tenemos ya al alcance técnicas fiables de almacenamiento de residuos nucleares, pero la inmensa mayoría las quiere "lejos de su casa". ¿Qué combinación de acciones técnicas, educativas y políticas nos permitirá alcanzar un acuerdo sobre esta cuestión, crítica en cualquier desarrollo futuro de la energía nuclear?

El hecho de que la actuación aislada de un solo país sea incapaz de resolver todos los problemas supone una complicación nada despreciable desde el punto de vista político. En cualquier caso, la enorme cantidad de energía que consumen los Estados Unidos pone de manifiesto que una acción de este país podría ejercer una incidencia significativa en las emisiones de carbono totales si se ahorrara energía dentro de los niveles de costes efectivos que establece la técnica existente. Y los Estados Unidos, con todo un pasado y un presente de uso intensivo de la energía y con su gran capacidad de innovación tecnológica, se pueden hacer

cargo de la responsabilidad que supone la transición hacia una era sin combustibles fósiles. Para conseguirlo, deben aumentar sus propios niveles de aprovechamiento, crear una nueva cartera de fuentes de energía y extender los recursos energéticos a los demás países. Los Estados Unidos podrían proponerse un doble objetivo: en primer lugar, aumentar la fracción de energía útil producida a partir de recursos no fósiles (mediante la sustitución de combustibles y un aprovechamiento mejor) en un 20 por ciento a finales de siglo; en segundo lugar, aumentar la producción de bienes y servicios por unidad de energía consumida en un 2,5 por ciento anual como mínimo a lo largo de las dos próximas décadas. Estos objetivos constituyen un reto arduo pero alcanzable, y podrían constituir un punto de referencia para los esfuerzos de las iniciativas que tomaran, tras él, otros países.

Sin embargo, el factor determinante del éxito final de la humanidad para frenar el deterioro mundial del medio ambiente es la respuesta colectiva de los países en vías de desarrollo para conseguir un buen uso de los recursos en sus economías. Las nuevas técnicas pueden ayudar a los países retrasados a obviar las prácticas indeseables del pasado y seguir nuevos caminos energéticos en su desarrollo. El mundo industrializado y los países en vías de desarrollo deben trabajar juntos para asegurar la disponibilidad y aceptación de los medios necesarios para alcanzar estos objetivos. La investigación en tecnologías energéticamente eficientes, cuyo coste suele ser similar al de los combustibles que ahorran, constituye la principal estrategia de que se dispone hoy por hoy para resolver el problema energético. Los retos son grandes, pero también las oportunidades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENERGY: THE CONSERVATION REVOLUTION. J. H. Gibbons y W. U. Chandler. Plenum Press, 1981.

NUCLEAR POWER IN AN AGE OF UNCERTAINTY. U. S. Congress Office of Technology Assessment, OTA-E-216, febrero de 1984.

NEW ELECTRIC POWER TECHNOLOGIES: PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE 1990S. U. S. Congress Office of Technology Assessment, OTA-E-246, julio de 1985.

ENERGY FOR A SUSTAINABLE WORLD. J. Goldemberg, T. B. Johansson, A. K. N. Reddy y R. H. Williams. World Resources Institute, 1987.

Nuevas estrategias industriales

Los desperdicios de un proceso fabril pueden servir de materia prima para otro, aliviando así los atentados de las industrias contra el medio ambiente

Robert A. Frosch y Nicholas E. Gallopoulos

Los ingenieros y otros expertos crean nuevas técnicas e industrias para satisfacer las necesidades humanas con mayor rendimiento y menor coste. La innovación es uno de los agentes principales del progreso. No obstante, el conocimiento limitado de los innovadores ocasiona, a veces, efectos marginales indeseables. Estas consecuencias imprevistas de los nuevos inventos no son patrimonio único de la febril industrialización de los siglos XIX y XX. Los mitos griegos de la antigüedad clásica recogían ya la historia de Pandora y su caja llena de plagas, la de Prometeo castigado por robar el fuego de los dioses y la de Icaro, que cayó del cielo cuando el calor del sol derritió la cera de sus alas. En tiempos históricos, el paso del cuero crudo al curtido permitió disponer de adornos y utensilios que tenían una mayor duración y eran más cómodos de usar y vestir, pero trajo consigo malos olores y enfermedades, por lo que las tenerías hubieron de alejarse de las comunidades a las que servían.

Estos efectos laterales pueden alcanzar hoy una resonancia global. Recordemos, por ejemplo, la invención de los clorofluorcarburos (CFC). Antes de que en la década de los treinta se desarrollaran estos productos, los compresores de los frigoríficos contenían amoníaco o dióxido de azufre; ambos productos son tóxicos y sus escapes mataban o producían lesiones a mucha gente. Los CFC salvaron vidas, ahorraron dinero y facilitaron la vida moderna: edificios con aire acondicionado y alimentos en buen estado de conservación. Sólo después de cierto tiempo los científicos determinaron que los CFC contribuían al calentamiento global de la atmósfera superior, interesando su equilibrio químico y destruyendo el ozono.

Estos errores no deberían empequeñecer el beneficio traído por la técnica a la población mundial. En muchas partes del globo, el nivel de vida es mejor hoy que hace veinte o treinta años. Muchos de los efectos negativos de la industrialización se han llegado a controlar posteriormente gracias a nuevas aplicaciones de la técnica. A pesar de todo, como la población y el nivel de vida mundial aumentan, ya no valen algunas de las antiguas soluciones para la contaminación industrial y los desperdicios cotidianos. A menudo, no hay "extramuros de la ciudad" donde instalar los equivalentes modernos de las tenerías y no quedan espacios abiertos fuera de los límites de los núcleos de población donde pueda verterse la basura sin causar daños.

En el año 2030, la población mundial se cifrará, a buen seguro, en 10.000 millones de personas. Lo ideal sería que todo el mundo disfrutara de niveles de vida equivalentes a los de las democracias industriales de Europa occidental, Estados Unidos o Japón. Esta situación duraría una década o incluso menos si consumieran los recursos naturales importantes —como cobre, cobalto, molibdeno, níquel y petróleo— al ritmo actual de los Estados Unidos, siempre que no se descubran nuevos recursos o se desarrollen sustitutos para los ya existentes. Y pasando cuentas de lo correspondiente a los desperdicios, 10.000 millones de personas que mantengan el ritmo actual de consumo de los Estados Unidos producirían 400.000 millones de toneladas de residuos sólidos, cuantía suficiente para enterrar el área metropolitana de la ciudad de Los Angeles a una profundidad de cien metros.

No pretendemos con estos números pergeñar un futuro sombrío, sino resaltar los incentivos que estimulen el aprovechamiento de los desperdicios, la conservación de los recursos actuales y su sustitución por materiales alternativos. Nos llevan también a la conclusión de que el modelo tradicional de actividad industrial, con procesos de fabricación que toman materias primas y generan productos manufacturados junto con desperdicios que han de desecharse, tendría que transformarse en un modelo más integrado: un ecosistema industrial. En este sistema se optimiza el consumo de energía y materiales, se reduce al mínimo la producción de desperdicios y los residuos de un proceso sirven de materia prima para otro, ya sean catalizadores utilizados en el refinado del petróleo, cenizas volátiles y sedimentadas procedentes de la producción de energía eléctrica o recipientes de plástico desechables de productos de consumo.

ROBERT A. FROSCH y NICHOLAS E. GALLOPOULOS trabajan en los laboratorios de investigación de la General Motors en Warren, Michigan. Frosch, que se doctoró en física teórica por la Universidad de Columbia, es vicepresidente responsable de investigación desde 1982. Con anterioridad fue directivo de la NASA y de la Institución Oceanográfica Woods Hole, así como encargado del programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente. Gallopoulos ha sido nombrado recientemente jefe del departamento de investigación de motores de la compañía General Motors, después de encabezar los departamentos de ecología y de combustibles y lubricantes. Gallopoulos realizó sus estudios de ingeniería química en las universidades de Pennsylvania y Texas A&M.

1. LAS PLANTAS INDUSTRIALES, como esta refinería de petróleo en Nueva Jersey, proporcionan los productos y materiales que mantienen la vida moderna. También generan contaminantes de los que es difícil deshacerse y que pueden tener efectos negativos de larga duración sobre el medio ambiente. Para salvaguardar los intereses ecológicos se necesitan plantas de producción que, además de alcanzar un mayor rendimiento, se adapten a un ecosistema industrial más armonioso. Los consumidores deben aprender, por su parte, a usar productos menos despilfarradores de energía.



El ecosistema industrial funcionaría de manera análoga a los ecosistemas biológicos. (Las plantas sintetizan los alimentos que nutren a los herbívoros, de los que a su vez se alimenta una cadena de carnívoros, cuyos restos y cadáveres alimentan finalmente a nuevas generaciones de vegetales.) Puede que en la práctica no se llegue a alcanzar nunca un ecosistema industrial ideal, pero fabricantes y consumidores habrán de cambiar sus estilos de vida y acercarse en lo posible a ese modelo, si queremos mantener el nivel de vida del mundo industrializado —junto con la mejora hasta un nivel similar al de las naciones en desarrollo— sin dañar el ambiente.

Si todas, naciones industrializadas y en vías de desarrollo, adoptan los cambios oportunos, será posible crear un ecosistema industrial más cerrado, de más fácil mantenimiento a pesar del agotamiento de materias primas y los problemas cada vez más preocupantes derivados de los desperdicios y la contaminación. Las naciones industrializadas deberán acometer cambios de todo tipo, pequeños y grandes, en sus costumbres actuales; por su lado, los países en vías de desarrollo tendrán que evitar técnicas envejecidas y menos en consonancia con la ecología para adoptar nuevas soluciones, compatibles con el método del ecosistema industrial.

En un ecosistema industrial ideal, los materiales no se agotan en mayor cantidad que en otro biológico. En teoría, un trozo de acero podría encontrarse un año en una lata de conservas, el siguiente en un automóvil y, diez años después, en la estructura de un edificio. Los materiales van así circulando y los procesos de fabricación se limitan a transformar las existencias en formas diferentes; estas existencias disminuyen cuando algo de material se pierde sin remedio y aumentan cuando el crecimiento de la población reclama satisfacer una mayor demanda. Este reciclaje todavía necesita el gasto de energía y el flujo inevitable de desperdicios y productos intermedios perjudiciales, pero en niveles mucho menores que los habituales de hoy en día.

La actividad industrial moderna no constituye un ecosistema ideal. Muchos subsistemas y procesos se encuentran lejos de la perfección. A pesar de todo, empiezan a aflorar avances esperanzadores. Algunos empresarios utilizan ya "residuos diseñados" o "chatarra de ingeniería" en la fabricación de metales y algunos plásticos, adaptando la producción de desperdicios de un proceso de fabricación de forma que puedan realimentar directamente ese proceso u otro emparentado. Otros diseñan sistemas de empaquetado que incorporen donde sea posible materiales reciclados o idean maneras ingeniosas de utilizar materiales que hasta entonces se reputaban mera basura.

Citemos tres ejemplos que ilustran algunos de los problemas implicados en el desarrollo de sistemas de procesos industriales autosuficientes: la conversión de los derivados del petróleo en plásticos, la transformación del mineral de hierro en acero y el refinado y la utilización de los metales del grupo del platino como catalizadores. Hemos escogido estos ejemplos porque cada uno representa una etapa diferente en la evolución de un ciclo cerrado. Examinando su funcionamiento y sus deficiencias deberíamos obtener algunas pautas para mejorar los subsistemas y así desarrollar un ecosistema industrial.

El ciclo del hierro, en el que el reciclaje constituye una fase bien asentada, es un proceso de añeja solera, cuya historia se remonta varios miles de años atrás, si bien la producción industrial de acero no comenzó hasta el siglo pasado. El ciclo del plástico, en el que la reutilización apenas acaba de comenzar, tiene menos de cien años; el primer plástico completamente sintético, la baquelita, apareció a principios de siglo. El ciclo de los metales del grupo del platino, de reutilización habitual debido al elevado coste de los materiales empleados, es incluso más reciente, ya que los metales nobles sólo empezaron a usarse en cantidades apreciables como catalizadores industriales a principios de la década de los cincuenta; el uso generalizado de metales nobles para reducir la contaminación de los gases de escape de los automóviles se remonta a menos de quince años.

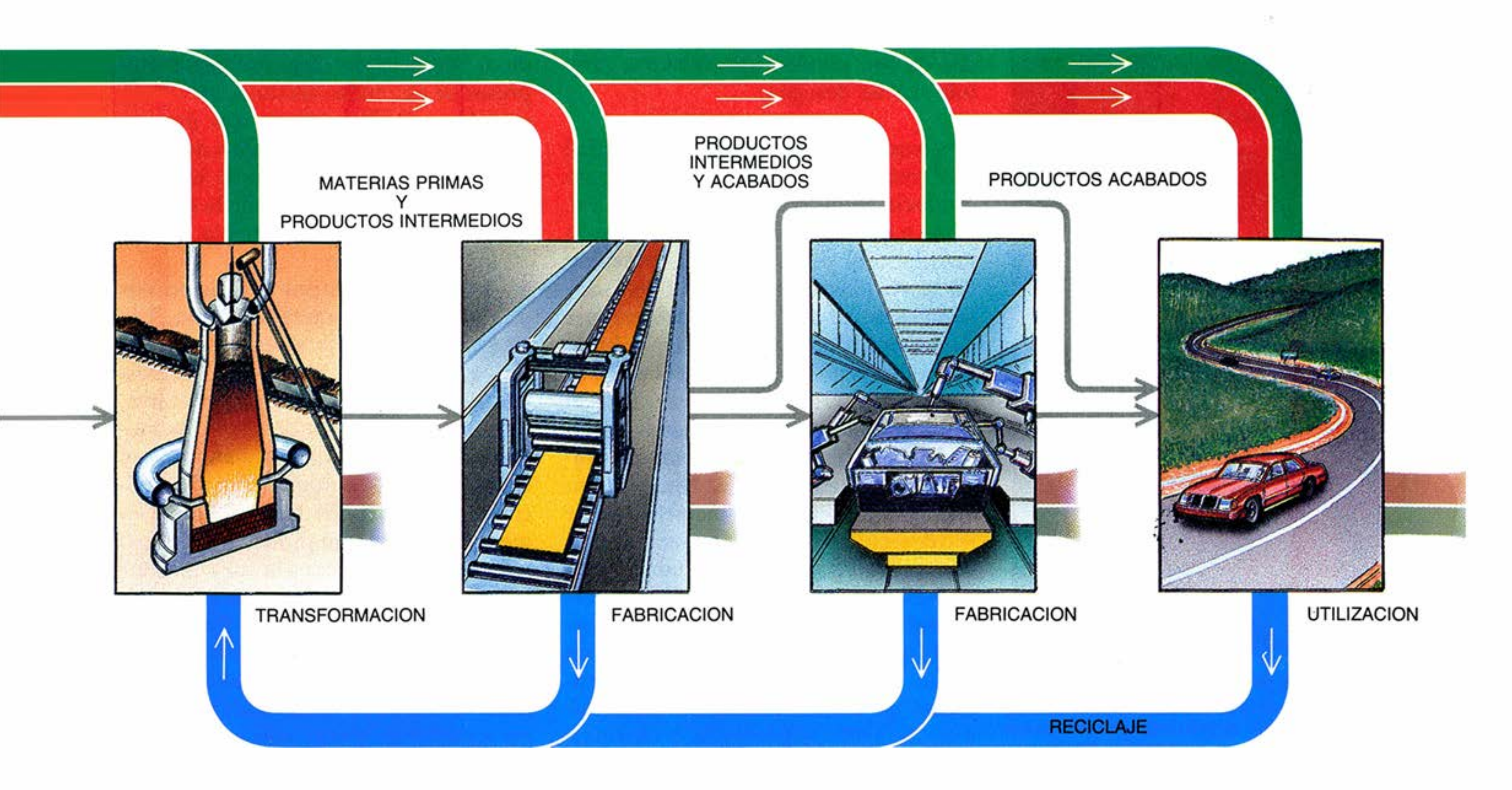


3. CICLO DEL ECOSISTEMA INDUSTRIAL: desde la extracción de los recursos hasta llegar a un producto acabado, que se puede reciclar des-

PERIODOS DE VIDA ESTIMADOS DE ALGUNOS RECURSOS GLOBALES

	INDICES ACTUALES DE CONSUMO		INDICES EN 2030	
	RESERVAS	RECURSOS	RESERVAS	RECURSOS
ALUMINIO	256	805	124	407
COBRE	41	277	4	26
COBALTO	109	429	10	40
MOLIBDENO	67	256	8	33
NIQUEL	66	163	7	16
GRUPO DEL PLATINO	225	413	21	39
CARBON	206	3226	29	457
PETROLEO	35	83	3	7

2. EXISTENCIAS MUNDIALES de algunas materias primas esenciales, que caerán hasta niveles peligrosamente bajos si los países retrasados aumentan su consumo hasta igualarse con el mundo industrializado. Las cifras muestran las reservas (cantidades que se pueden extraer provechosamente con la técnica actual) y los recursos (cantidades totales que se supone existen). La estimación de los años que quedan hasta el agotamiento se basa en el actual consumo global (*izquierda*) o en la suposición de que en el año 2030 el consumo de una población de 10.000 millones alcanzará los índices actuales de USA (*derecha*).



pués de su uso (*azul*) para entrar de nuevo en el ciclo como materia prima. (En este caso se muestra el ciclo del hierro y del acero.) En cada etapa del proceso de fabricación se añaden energía (*rojo*) y materias primas adicionales (*verde*) y se pierde calor y productos intermedios. En un ciclo óptimo no se tiran los desperdicios; se reutilizan en el mismo proceso de fabricación o en otro diferente. Así pues, el ecosistema industrial remeda el ecosistema biológico.

El sistema de los plásticos puede alcanzar un rendimiento teóricamente muy alto, cuya consecución representa un desafío abierto. Los plásticos forman un grupo diverso de compuestos químicamente complejos, cuyo uso se ha disparado hasta el punto de que sus desechos se han convertido en un problema de preocupación creciente. Los plásticos están constituidos por varios productos, y las diversas resinas plásticas son difíciles de distinguir. Dificultad que crea problemas en la recogida, clasificación y reciclaje de los desechos. Además, la descomposición de los plásticos en sus componentes químicos originales suele ser una tarea técnicamente imposible o carente de rentabilidad económica.

No obstante, deben sopesarse beneficios y desventajas de los plásticos. Los recipientes de plástico son más seguros que los antiguos de vidrio. La sustitución del vidrio por el plástico en las botellas de leche y en los recipientes de productos de aseo corporal, como el champú, ha evitado innumerables accidentes, desde simples cortes hasta heridas graves. Los recipientes de plástico son, por lo común, más livianos que los de metal o de vidrio, con lo que se necesita menos energía para su transporte; también en su fabricación, en particular si son reciclados, se consume menos energía que en el caso de los recipientes de metal o vidrio. El Instituto de Investigación del Medio Oeste en Kansas City, Missouri, ha determinado que los recipientes de cloruro de polivinilo (PVC) de dos litros necesitan menos de la mitad de energía en su producción y transporte que los recipientes de vidrio, y en su fabricación se consume una masa veinte veces menor de materias primas y menos de la tercera parte de agua. También se produce menos de la mitad de desperdicios que en la fabricación del vidrio.

Cada clase de plástico plantea sus propios problemas, a tenor de su composición y uso. El PVC, cuya producción anual en los Estados Unidos es de casi cuatro millones de toneladas, constituye un ejemplo espectacular de las complicadas amenazas que representan los plásticos para el medio ambiente. Este material, que supone aproximadamente una sexta parte de la fabricación total de plástico, se utiliza en productos que van desde tuberías y piezas de automóviles hasta botellas de champú. Su producción necesita hidrocarburos y cloro. (El cloro hace que el efecto de este plástico sobre el medio ambiente sea mayor que si se emplearan sólo hidrocarburos, como es el caso del polietileno.) El PVC se obtiene en los Estados Unidos a partir del gas natural, sobre todo; en los demás países se emplea nafta, que es un derivado del petróleo. En cualquier caso, la materia prima se convierte en etileno, que se clora para formar el monómero de cloruro de vinilo; las moléculas de monómero se ensamblan luego para formar el PVC.

Ha mejorado el rendimiento del proceso de fabricación. Los empresarios han introducido células de membrana de mayor rendimiento en la electrólisis del cloruro sódico necesaria en la producción del cloro. (El cloruro sódico —sal común— se disuelve en cubas a través de las cuales pasa una corriente; los iones de sodio van a un electrodo y los de cloro al otro. Una membrana separa ambos electrodos.) Las células de membrana eliminan también el amianto y el mercurio que se empleaban en las antiguas cubas electrolíticas, reduciendo así los residuos peligrosos.

A pesar de ello, el proceso de producción del PVC es un ejemplo de las clásicas medidas de control tomadas "en la boca de desagüe" para reducir los contaminantes. Las emisiones del monómero de cloruro de vinilo se controlan rigurosamente durante la producción, medida que se adoptó cuando se descubrió que el monómero era tóxico y cancerígeno. El cloruro de vinilo que no reacciona se elimina del PVC recién acabado, mediante vapor de baja presión.



4. ENVASES DE BEBIDAS, apilados en balas, en un importante centro de reciclaje de Nueva Jersey. Se pueden reprocesar en productos plásticos como fibra de poliéster y piezas moldeadas. El año pasado se recogieron unas 68.000 toneladas de botellas fabricadas con teraftalato de polietileno (PET) en los nueve estados de la Unión cuya normativa impone la recogida de estos residuos; la producción total de la nación es de 340.000 toneladas.

Gran parte del monómero se recupera y recicla; pero otra parte queda en concentraciones mínimas, lo que impide su recuperación y reciclaje y se envía a un incinerador para su descomposición. Los depuradores eliminan, de la salida de gases, el ácido hidroclórico.

El reciclaje del PVC durante su fabricación es un proceso casi directo. Las plantas que fabrican derivados de PVC reciclan habitualmente la inmensa mayoría de los desechos. En la General Motors, por ejemplo, las rebabas generadas en la fabricación de piezas de PVC, como molduras decorativas, fundas de asientos y tableros de mandos, se separan según su color, se trituran, se funden y se utilizan junto con PVC virgen.

Pero una vez que el plástico llega al mercado de consumo, el reciclaje se complica. Sólo se recicla un uno por ciento del PVC desechado por los consumidores. La amplia gama de productos en los que está presente el PVC hace que su recogida y recuperación resulte más difícil, aunque ofrece también oportunidades interesantes. Por ejemplo, los posibles peligros para la salud y la responsabilidad que comporta impiden la incorporación de plásticos reciclados en recipientes donde este material esté en contacto directo con alimentos; en cambio, las botellas recicladas de PVC pueden aprovecharse para tuberías de desagüe.

Otros productos de vinilo de difícil reciclaje pueden quemarse para producir calor o electricidad. El PVC viene a encerrar tanta energía como la madera o el papel, pero su contenido de cloro plantea problemas: los incineradores que queman PVC deben tener depuradores para evitar la emisión de ácido hidroclórico, que contribuye a la lluvia ácida. Durante la combustión, el cloro forma también pequeñas cantidades de dioxinas, unos potentes cancerígenos, según se cree. Nada de eso alienta precisamente la incineración de PVC desechado. Aunque recientes pruebas realizadas por el Departamento de Investigación y Desarrollo de la Energía del estado de Nueva York han mostrado que si los incineradores tienen un diseño adecuado y funcionan correctamente no emiten cantidades significativas de ácido hidroclórico o dioxinas, los ecologistas y las autoridades no están convencidos de que se alcancen esos bajos niveles de emisión en la práctica.

Por culpa de su contenido en cloro, el PVC se ha convertido en el problema más grave de cuantos plantean los plásticos. Otros polímeros, como el propileno o el polietileno, ofrecen menos peligro para el medio ambiente. Poseen propiedades físicas semejantes a las del PVC, pero no contienen cloro. El teraftalato de polietileno (PET), material utilizado en las botellas de bebidas carbónicas, se recicla en nueve de los estados de la Unión que tienen leyes obligatorias para el depósito de estas basuras: California, Connecticut, Delaware, Maine, Massachusetts, Michigan, Nueva York, Oregon y Vermont. Las botellas recogidas en estos estados suman 70.000 de las 340.000 toneladas de resina de PET producidas anualmente. Los recicladores pagan de 100 a 140 dólares por tonelada de PET, lo que le convierte en el segundo residuo sólido urbano más valioso, por detrás del aluminio. El PET se reconstituye en resinas para el moldeo por inyección, empleadas en la fabricación de productos que van desde piezas de automóviles hasta dispositivos electrónicos, o se enrolla en fibras de poliéster que se utilizan en almohadones, muebles tapizados, monos aislantes y revestimientos.

Con el crecimiento de la infraestructura para la recogida y clasificación de PET y otros plásticos de consumo, deberían aumentar notablemente los índices de reciclaje. Según algunas empresas de ese nuevo sector, como Wellman Inc., de Shrewsbury, que procesa alrededor de 45.000 toneladas de PET al año, el límite del mercado de los plásticos reciclados no lo impone la demanda, sino la eficacia de recogida.

El sistema industrial del hierro nos abre un panorama diferente. Las técnicas de reciclaje están bien definidas y existe una importante infraestructura para la recogida de chatarra. A pesar de todo, los desperdicios metálicos continúan amontonándose en las chatarrerías porque no existe suficiente demanda. El hierro como elemento, componente principal del acero y del hierro forjado, es la columna vertebral de la vida moderna; se utiliza en obras públicas, automóviles y construcción. En los Estados Unidos la producción de hierro comienza cuando el mineral se extrae de minas a cielo abierto en gigantescos pozos con profundidades de cien metros o más. La mena se concentra en la mina formando grandes bolas ("pellets"), tras lo cual se transforma en arrabio en un alto horno, donde se calienta con coque, caliza y aire. El coque aporta carbono a la mezcla, y la caliza y el oxígeno del aire reaccionan con las impurezas del mineral formando escoria que luego se elimina. Añadiendo pequeñas cantidades de otros elementos se obtiene el acero que se utiliza en fundiciones, trenes de laminado o en la forja de barras, planchas, vigas y chapas.

Después de que el hierro haya tomado la forma de los diferentes productos, que acabarán, andando el tiempo, por desecharse, sus propiedades (especialmente su ferromagnetismo) facilitan su identificación y separación. La ingente cantidad de hierro en circulación facilita el reciclaje y lo hace económicamente rentable. No es sorprendente, por tanto, que cada año millones de toneladas de chatarra se añadan al mineral de hierro para la fabricación de productos de acero. La chatarra sobrante en la fabricación de piezas de automóviles, por ejemplo, se recicla en bloques de motor y otras piezas de fundición. Las cuatro fundiciones que abastecen la General Motors se alimentan exclusivamente del acero sobrante que procede de otras actividades de la empresa y de la chatarra de hierro producida durante el proceso de fundición.

A pesar de su relativa sencillez, el proceso de reciclaje del hierro no es un ciclo cerrado. Gran parte de la chatarra

procedente de los productos de consumo desechados no se recupera, sino que se amontona en espacios abiertos donde se corroe un poco cada año y se la supone una plaga más que una bendición. En 1982, la chatarra recuperable de hierro sumaba 610 millones de toneladas y a finales de 1987 la cifra había subido a más de 750 millones. Un motivo, y no pequeño, de este aumento residió en la producción de hierro y acero en los Estados Unidos durante ese período, la más baja desde el final de la segunda guerra mundial. La demanda de chatarra para la fabricación de acero disminuyó mientras continuaban desechándose al mismo ritmo los productos de hierro y acero.

Los cambios de tendencias en la producción de acero, en los Estados Unidos y en el resto del mundo, son los responsables del aumento de chatarra. Culpable sutil es el paso tecnológico de hornos de reverbero a hornos básicos de oxígeno para la producción de acero. Los hornos básicos de oxígeno (así denominados porque producen el acero en un gran recipiente cerrado al que se suministra oxígeno a presión) sólo admiten 25 toneladas de chatarra mezcladas con 100 toneladas de arrabio procedente del alto horno, mientras que en el caso del horno de reverbero la mezcla es a partes iguales.

El cambio a los hornos básicos de oxígeno comenzó en Estados Unidos hacia 1958; actualmente, los hornos de reverbero cubren menos del tres por ciento de la producción total. Este tipo de hornos se adoptó para mejorar el rendimiento de la producción y aliviar la contaminación atmosférica, pero su desaparición ha contribuido a la disminución del reciclaje del hierro. Al realizar estos cambios, los siderúrgicos no contaban con ningún mecanismo económico para la absorción de los efectos nefastos que sobre el medio ambiente ejerce la acumulación de chatarra o las consecuencias a largo plazo que pueden derivarse de consumir más mineral de hierro por cada unidad de acero.

De unos años acá se han venido construyendo pequeños trenes laminadores que operan con hornos de arco eléctrico y consumen casi exclusivamente chatarra de acero. Estas laminadoras de bajo volumen han aumentado su contribución a la producción de acero en los Estados Unidos, pero ello no basta para compensar el descenso de la demanda de chatarra que alimentaba a los hornos de reverbero. Además, estos pequeños trenes de laminación producen sólo una limitada gama de productos de acero, muchos de los cuales han de fabricarse a partir de chatarra que contenga muy bajos niveles de impurezas. Si la chatarra alberga un exceso de cobre, por ejemplo, no sirve para fabricar chapas de acero, pues resultaría demasiado quebradiza para su posterior conformación. Si se quiere que los hornos de arco eléctrico incidan de manera significativa en las existencias de chatarra de hierro en los Estados Unidos, deben acoplarse a instalaciones que produzcan una gama más amplia de productos y han de ingeniarse otras técnicas para utilizar la chatarra con impurezas.

Los metales del grupo del platino (platino, paladio, rodio, rutenio y osmio) constituyeron un sistema industrial que ofrecieron un extraordinario rendimiento hasta mediados de la década de los setenta. Llegaron a reciclarse con un rendimiento del 85 por ciento, o incluso mayor. Mas la aparición de convertidores catalíticos para automóviles infringió un duro golpe a este ecosistema, del que ahora está empezando a recuperarse para volver a los antiguos índices de reciclaje.

El reciclaje de los metales del grupo del platino no ha venido instado por los efectos de sus residuos sobre el medio ambiente, sino por sus limitadas existencias y las dificultades de su refinado y extracción. Los minerales sólo contienen alrededor de siete partes por millón de metales del grupo del platino mezclados; ello significa que deben refinarse anualmente unos 20 millones de toneladas para producir 143 toneladas de metales purificados, cantidad que cabría en un cubo de unos dos metros de arista.

Alrededor del 60 por ciento de los metales del grupo del platino que se extraen se destina a la producción de joyas, lingotes para inversores y recipientes para reacciones químicas; estos productos se reciclan posteriormente con un rendimiento casi perfecto. El resto de la producción se aprovecha en sustancias químicas y catalizadores para plantas químicas, refinerías de petróleo y automóviles. Los catalizadores adsorben moléculas en su superficie y facilitan reacciones químicas que hacen que las moléculas se unan o se disocien en otras menores. Los convertidores catalíticos para automóviles, que reducen la emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno en los gases de escape, son la aplicación de mayor auge, de los metales del grupo del platino; el consumo se elevó desde las aproximadamente 11,5 toneladas métricas de 1975 hasta unas 40 en 1988. Hoy día la industria del automóvil consume la mayor parte de la producción anual permanente de los metales del grupo del platino.



5. CHATARRA METALICA, procedente de la fundición y mecanización de piezas de motores, esperando el reciclaje en una fundición de la General Motors en Defiance, Ohio. Las cuatro fundiciones que operan a cargo de la compañía se alimentan de chatarra procedente de estampación de chapa metálica, fundición de hierro y procesos de mecanizado. A pesar de que la chatarra puede reciclarse con relativa facilidad, millones de toneladas se amontonan por falta de un mercado preparado para transformarla.

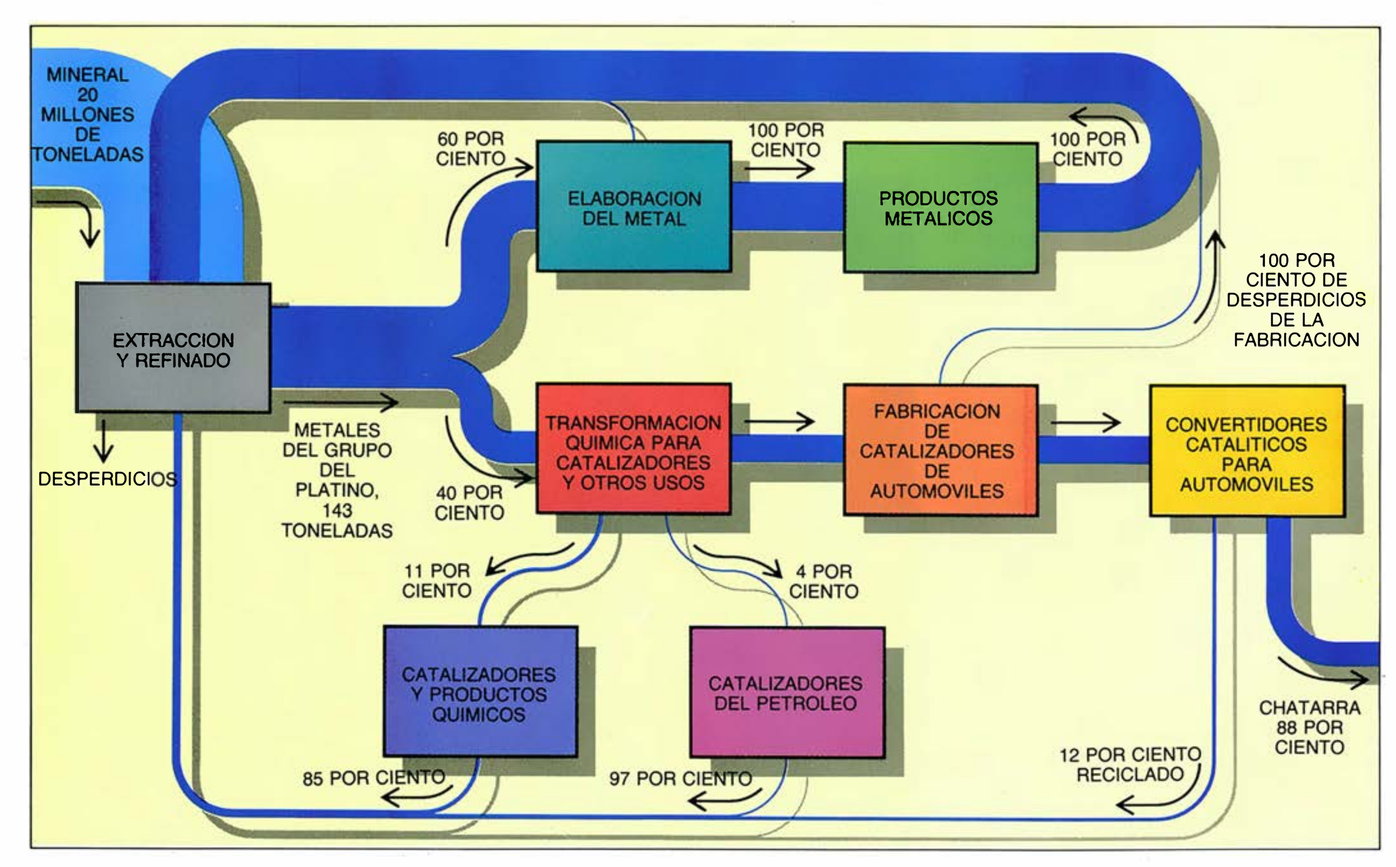
Los metales del grupo del platino utilizados en la industria se reciclan con un rendimiento notablemente alto. Cada factoría utiliza grandes cantidades de catalizadores, por lo que las ventajas del reciclaje son obvias. Los catalizadores usados se reciclan generalmente cada pocos meses, facilitando a los recicladores un flujo continuo de materiales bastante elevado. En las plantas químicas y farmacéuticas, por ejemplo, los catalizadores suelen reciclarse antes de que transcurra un año y se recupera alrededor del 85 por ciento de los metales del grupo del platino que contienen. Algunas refinerías de petróleo alcanzan un rendimiento incluso mayor, recuperando hasta el 97 por ciento de sus metales nobles.

Las pautas de utilización de los metales nobles en la industria del automóvil contrastan abiertamente con las habituales en las industrias de procesado: hay decenas de millones de convertidores catalíticos, cada uno de los cuales contiene sólo unos gramos de metales del grupo del platino (menos de dos gramos de platino); ello, unido al período de vida del vehículo medio, unos diez años, determina la exasperante lentitud de la recuperación de materiales. De ahí que sólo se recicle alrededor del 12 por ciento de los metales del grupo del platino encerrados en los convertidores catalíticos.

Los bajos índices de reciclaje en los catalizadores de automóviles cabe atribuirlo, de modo casi absoluto, a la falta de un método eficaz de recogida de los convertidores desechados. Se domina bastante bien la técnica a seguir para recuperar los metales del grupo del platino de los convertidores; una planta instalada en 1984 por la Texasgulf & Minerals, Inc., en Alabama, recupera un noventa por ciento del platino, un noventa por ciento del paladio y un ochenta por ciento del rodio de los convertidores usados. Sin embargo, millones de convertidores sueltos andan dispersos por miles de chatarrerías y casi dos mil recicladores de desguaces de automóvil. El coste de localizar, recoger y vaciar los convertidores y transportar el catalizador hasta una planta de tratamiento es altísimo; el reciclaje no resulta rentable en la mayoría de las operaciones de refinación, a menos que el precio del platino supere las 2400 pesetas por gramo.

Las perspectivas para el reciclaje de los convertidores catalíticos están mejorando. La primera generación de automóviles provistos de convertidores catalíticos está llegando a las chatarrerías de los Estados Unidos, con lo que aparecerá un importante suministro continuo de materias primas para los recicladores. Importa, sobre todo, que se consolide la infraestructura para la recogida de convertidores usados; ya hay compañías japonesas, como la Nippon Engelhard, que han organizado una red de recogida en los Estados Unidos para adquirir catalizadores de automóviles con vistas a su reprocesado en Japón. Además, la introducción de controles más estrictos en la emisión de gases de escape en Europa, donde no son preceptivos los convertidores catalíticos, aumentará la demanda de los metales del grupo del platino y se fomentará así la rentabilidad del reciclaje.

Los ciclos de vida de los plásticos, el hierro y los metales del grupo del platino ilustran algunos de los problemas implicados en la creación de sistemas industriales soportables. Impor-



6. METALES DEL GRUPO DEL PLATINO recuperados eficazmente de los objetos de joyería y otros productos metálicos. Ambos usos constituyen alrededor del sesenta por ciento del consumo de estos materiales. Los catalizadores y los productos químicos industriales, que también se reciclan con un gran rendimiento, suman otro 6 por ciento. La utilización de mayor auge para estos metales está en los convertidores catalíticos para automóviles, aplicación que se caracteriza por su bajo índice de reciclaje. Se está creando la infraestructura necesaria para recolectar los millones de convertidores que llegan cada año a los desguaces de automóviles y para recuperar los dos gramos de platino que se encuentran aproximadamente en cada convertidor.

ta, asimismo, la incardinación de las entradas y salidas de cada proceso en el ecosistema industrial general. Este vínculo es fundamental para la consecución de un sistema cerrado o casi cerrado.

Lo mismo que en sus análogos biológicos, los procesos individuales de fabricación dentro de un ecosistema industrial eficiente contribuyen al funcionamiento óptimo de todo el sistema. Se necesitan procesos cuya producción de desperdicios no reciclables (calor incluido) sea mínima, al igual que el consumo permanente de materiales escasos y recursos energéticos. Los distintos procesos de fabricación no pueden considerarse por aislado. Un proceso que produzca cantidades relativas de desperdicios con posibilidad de utilización en otro proceso habrá que preferirlo ante otro en el que se genere menor cantidad de desperdicios, pero carezca de aprovechamiento ulterior.

Un buen ejemplo de estos aspectos que estamos considerando lo tenemos en la reducción de peso de los productos manufacturados con plásticos, materiales compuestos ("composites") y aleaciones de alta resistencia. Esta tendencia hacia la reducción de peso se ha consolidado en los últimos años. El peso del automóvil medio, por ejemplo, ha disminuido más de 400 kilogramos desde 1975, de los cuales alrededor de 100 kilogramos se deben a la sustitución del acero por aluminio y plástico. Los automóviles más ligeros consumen menos combustible. El acero, sin embargo, es fácil de reciclar, mientras que los compuestos plásticos que lo han sustituido se resisten a la reutilización. El resultado neto puede ser una disminución inmediata del consumo de combustible, aunque, también, un aumento global de los recursos consumidos y de la cantidad de desperdicios permanentes generados.

Los esfuerzos para reducir al mínimo los desperdicios en las industrias químicas y del petróleo en los Estados Unidos han recibido el apoyo legal con las normas aprobadas a finales de los setenta sobre control de la eliminación de residuos peligrosos. Las disposiciones legales, con la mente puesta en los costes que a largo plazo tendrán sobre el medio ambiente, han aumentado el precio del depósito en vertederos desde menos de 20 dólares por tonelada a 200 dólares o más, lo que rentabiliza las soluciones alternativas a la eliminación de los desechos. Muchas compañías encuentran rentable la venta, como materia prima, de los residuos que generan. Por citar una, la compañía Meridian National, de Ohio, dedicada al tratamiento de acero, reprocesa el ácido sulfúrico con el que decapa las planchas y chapas de acero, reutiliza el ácido y vende compuestos de sulfato ferroso a los fabricantes de cintas magnéticas.

La eliminación de la producción de residuos imposibles de reciclar exige tomar medidas similares para cada uno de los productos intermedios de bajo nivel, que se generan en grandes cantidades durante un determinado proceso. Aunque los vertidos de cada etapa de estos procesos de fabricación no fueran excesivos, considerados globalmente pueden provocar serios problemas de contaminación. La reducción, uno a uno, de esos innumerables microvertidos supone un desafío complejo y presumiblemente costoso.

Podemos salir al paso de ese reto empezando por introducir múltiples cambios pequeños. En ese sentido, algunas plantas químicas y refinerías de petróleo han rebajado notablemente su producción de vertidos peligrosos con sólo modificar sus procedimientos de compra y almacenamiento de disoluciones de limpieza y otros productos de bajo volumen. Acabaron así con la necesidad de tener que desprenderse de las cantidades sobrantes.

En las instalaciones de la refinería ARCO de Los Angeles, una serie de cambios bastante baratos ha reducido el volumen de residuos desde unas 11.000 toneladas anuales, a principios de los ochenta, hasta unas 3100 hoy, lo que genera unos ingresos y un ahorro de aproximadamente dos millones de dólares anuales en gastos de eliminación de desperdicios. La compañía vende sus catalizadores de alúmina ya usados a Allied Chemical y los de sílice a cementeros. La lesgilación clasificaba esos materiales entre los residuos peligrosos y había que deshacerse de ellos en vertederos a un precio de 300 dólares por tonelada.

El lodo de carbonatos alcalinos procedente de una operación de ablandamiento de agua en la refinería va a parar a una fábrica de ácido sulfúrico, distante unos kilómetros, que lo usa para neutralizar aguas residuales ácidas. (Antes, el empresario compraba hidróxido sódico puro para el mismo propósito.) Unas cuantas tuberías de desagüe han sido desviadas para facilitar la carga de material y el personal de la planta debe controlar el *p*H del lodo; pero la inversión total ha sido mínima.

La petroquímica ARCO ha comenzado también a recuperar petróleo, procedente de escapes producidos en el interior de la refinería junto con otros desechos en una nueva instalación de reciclaje de un millón de dólares. Cuando el reciclador alcance pleno funcionamiento, el próximo año, se ahorrarán otras 1800 toneladas de residuos. Otros desperdicios —disolventes, botes nebulizadores y los cientos de toneladas de amianto aislante que anualmente se están eliminando de la planta— necesitarán un tratamiento en otro lugar o su enterramiento en un vertedero.

El caso de ARCO no es único. Otras industrias del sector de la petroquímica se hallan empeñadas en esfuerzos similares. Lo avala el ejemplo de la planta de Ciba-Geigy en Toms River, que rebajó los gastos de eliminación de residuos en más de 1,8 millones de dólares entre 1985 y 1988 gracias a una inversión de 300.000 dólares en los cambios de procesos y en maquinaria de recuperación. Dow Chemical instaló una unidad independiente para recuperar el ácido hidroclórico sobrante, que, a continuación, se recicla para procesos que utilicen ácidos o se vende en el mercado. Con la operación se recuperan anualmente un millón de toneladas de ácido con un beneficio de 20 millones de dólares.

En el ecosistema industrial, los productos intermedios y los residuos generados durante un proceso de fabricación representan sólo la parte correspondiente al abastecimiento del sistema. El lado de la demanda corresponde al consumidor que adquiere productos manufacturados y crea, a su vez, desperdicios que podrían constituir la materia prima para el siguiente ciclo de producción. Si queremos que el método del ecosistema industrial se generalice, entonces los cambios en los procesos deben hallar su contrapartida en los cambios en las tendencias de consumo de los usuarios y en el tratamiento de los materiales después de comprados y utilizados.

El comportamiento actual de los consumidores constituye una aberración en el tiempo y en el espacio. Mientras que un neoyorquino medio elimina diariamente, y por término medio, casi dos kilogramos de residuos sólidos, un ciudadano de Hamburgo o de Roma se deshace de la mitad de esa cantidad, más o menos la que tiraban los neoyorquinos a principios de siglo. Además, las costumbres de los consumidores estadounidenses y las formas de



7. LOS DESPERDICIOS QUE GENERA LA SOCIEDAD DE CONSUMO agotan la capacidad de los vertederos, como éste de Deptford. Los problemas ecológicos planteados se podrían evitar cambiando las costumbres de eliminación de residuos. La clasificación de las basuras para facilitar el reciclaje de papel, vidrio y plástico retarda la saturación de los vertederos y reduce el consumo de los recursos.

tratamiento de los desperdicios tejen una complicada trama que dificulta los esfuerzos para reducir la generación de desperdicios y la creciente saturación que sufren los vertederos municipales. La mayoría de los desperdicios de los consumidores consisten en materiales orgánicos y plásticos que fácilmente se podrían reciclar, quemar para producir energía o transformar en abonos compuestos; en cambio, se almacenan en vertederos, para los que, en el pasado, se disponía de terreno, cuyos costes eran bajos.

En este momento los vertederos de los Estados Unidos están al borde del colapso. Muchos municipios han iniciado programas de clasificación de basuras para reducir la cantidad de desperdicios sin reciclar, y cabe pensar que continuarán esas iniciativas. Otros países han implantado ya métodos bastante refinados de recogida y tratamiento, que van más allá del reciclaje y la clasificación habituales. Japón, Suecia y Suiza, por ejemplo, han establecido centros de recogida de pilas utilizadas en radios portátiles y otros productos de consumo. Las pilas contienen metales pesados que suponen un estorbo a la hora de convertir los desperdicios en abonos apropiados para fertilizar cosechas. Los metales también contaminan las cenizas volátiles y sedimentadas de los incineradores; ceniza que debe, pues, eliminarse como si fuera un resto peligroso.

Una infraestructura sólida de recogida y clasificación de la basura arrojada por el consumidor mejoraría drásticamente el rendimiento del ecosistema industrial. El consumidor norteamericano debería, quizá, dejar de generar indiscriminadamente grandes volúmenes de desperdicios sin clasificar, sin que el nivel de vida global de los Estados Unidos se viera afectado. Además, los vertederos municipales se están quedando pequeños con la misma rapidez que los industriales. Los consumidores habrán de restringir su volumen de basura por las mismas razones económicas que fuerzan a hacer lo propio a los industriales.

La creación de un ecosistema industrial viable es algo muy deseable desde una perspectiva ecológica; en algunos casos resulta, además, altamente rentable. Existen, sin embargo, obstáculos para que se lleve a buen puerto. La sociedad y la empresa ha de cambiar su estilo de comportamiento y ceder paso al método del ecosistema; las normas y disposiciones legales deben tornarse más flexibles para no dificultar indebidamente el reciclaje y otras medidas que reduzcan al mínimo los residuos.

La normativa federal sobre residuos peligrosos en los Estados Unidos constituye un buen ejemplo de análisis. A veces impone que la minimización de desperdicios acabe siendo más difícil que tirarlos a la bolsa de la basura. Debido a los estrictos requisitos para documentar y llevar a cabo la manipulación de los desperdicios clasificados como peligrosos, muchas compañías prefieren comprar sus materias primas a través de las vías tradicionales de suministro antes que verse envueltas en la burocracia legal. Algunos estados estimulan una forma innovadora de abordar la cuestión: en California, por ejemplo, se publica un catálogo bianual que intenta poner en contacto a los productores de desperdicios con posibles compradores, otros fabricantes que necesitan los materiales desechados por los primeros. En 1987 se reciclaron alrededor de medio millón de toneladas de residuos peligrosos cuyo fin no hubiera sido otro que el vertedero. Una docena de intercambios de desperdicios entre estados, condados o provincias y regiones funcionan en los Estados Unidos y Canadá.

Además de subvencionar medidas innovadoras que limiten los residuos, los gobiernos necesitan revisar los incentivos que promuevan procesos de fabricación viables. El aumento del precio de los vertederos ha obligado a las compañías a mejorar los procesos industriales y a reducir los residuos no reciclables, pero muchos vertidos menores se siguen controlando por la vieja reglamentación de "boca de desagüe", que especifica la cantidad de cada contaminante que se puede verter. Las compañías se hallan obligadas a cumplir los requisitos legales, pero no se les ofrecen ventajas directas para los fabricantes que atrapan y manipulan los residuos de bajo nivel o que modifican sus procesos con productos intermedios más benignos.

Los métodos económicos al uso sólo miran los efectos inmediatos de las decisiones de producción. Si, por poner un caso, un fabricante produce envases desechables, de los bolsillos de los contribuyentes saldrá el dinero, en buena medida, que sufrague el encarecimiento de los vertederos; si una central de energía reduce las emisiones de gases que producen lluvia ácida, es probable que los beneficios los disfruten comunidades situadas en otro lugar. Las ganancias para el fabricante o la instalación suelen ser indirectas.

Los economistas han venido abogando desde hace tiempo por el establecimiento de incentivos financieros en vez de normas absolutas para la reducción de la contaminación. Medidas que incluyen créditos de inversión o investigación, exención de cargas fiscales y gravámenes o cuotas de los fabricantes según la cantidad y la naturaleza de los materiales peligrosos que produzcan. Estas medidas pueden ayudar a pagar los costes del tratamiento o la eliminación de residuos; y lo que es más im-

portante, las compañías encuentran un motivo para cambiar sus procesos de fabricación de modo que se reduzca la producción de residuos peligrosos. Los impuestos y cuotas por contaminación hacen que los costes de medio ambiente corran a cargo del fabricante, de manera que se convierten en asientos contables cuando se toman decisiones sobre la producción.

Las cuotas por contaminación han sido objeto de las iras de ecologistas e industriales: aquéllos las consideran "licencias para contaminar", éstos "distorsiones del mercado". Ambas críticas son válidas en abstracto. Las compañías pueden soportar unas cuotas bajas como un coste más del negocio y cargarlo en el precio de venta; por contra, unas cuotas altas pueden obligar a las compañías a reducir la producción de determinados contaminantes, sin que se preste atención a otros efectos ecológicos o a las cargas financieras que les sobrevienen.

Ahora bien, la conjugación proporcionada de impuestos e incentivos puede constituir un medio eficaz para que los fabricantes incorporen el precio social de la contaminación y los residuos en sus sistemas de contabilidad. Como en el caso de la subida de precios para residuos peligrosos en los vertederos, la realimentación de los costes de otros contaminantes podría hacer más atractiva la resolución de los problemas en su origen, y no esperar a degradarlos o eliminarlos una vez producidos. Estas cuotas permiten la participación de los fabricantes en el ahorro económico que comporta la merma de desechos peligrosos. Los incentivos económicos acelerarían el fuerte impulso competitivo de todo fabricante a abaratar sus costes. Los empresarios que hicieran caso omiso de esta exigencia desaparecerían del mercado, lo que sucedería igualmente si se les penalizara con los costes sociales de la contaminación.

Los incentivos económicos no bastan por sí solos para instaurar el ecosistema industrial. Los procesos tradicionales de fabricación están pensados para que proporcionen los máximos beneficios inmediatos al fabricante y a los consumidores de un producto determinado en un sistema económico, sin mayores consideraciones sobre el beneficio del sistema en su conjunto. Hay que pensar en enfoques globales si se quiere alcanzar el equilibrio adecuado entre beneficios económicos estrechamente definidos y exigencias ecológicas. (Ni que decir tiene que, en un sentido amplio, las metas económicas y ecológicas son las mismas: los lugares incómodos para vivir no son buenos mercados de consumo.)

Los conceptos de ecología industrial y optimización del sistema merecen una mayor difusión. Los planes de enseñanza de las escuelas e institutos politécnicos u omiten su docencia o los exponen de forma muy limitada, sin que calen lo suficiente y lleguen a plantear la resolución de los problemas ecológicos asociados con la producción industrial. Pero no bastará con cambiar el contenido de los planes de estudio. La doctrina de la ecología industrial ha de entrar en la mente de autoridades públicas, dirigentes empresariales y medios de comunicación. Deben abrirse paso en la conciencia social y orientar la actividad de la administración y de las industrias.

La normativa gubernamental de producción de residuos local, nacional e internacional continuará desempeñando un papel de primer orden en la transición de los métodos tradicionales de fabricación a un ecosistema industrial. Esta transición se aceleraría adoptando con prontitud incentivos económicos como parte del sistema de reglamentación.

Para que las leyes adquieran eficacia real, las autoridades deben fundamentar su política en una buena tecnología, susceptible de admitir cambios. Debe mirarse que las normas dictadas estimulen (o al menos no dificulten) el desarrollo de procesos alternativos y métodos innovadores para la manipulación de productos industriales intermedios. Los legisladores deben apoyarse en el conocimiento práctico de las industrias para evitar medidas de control que frenen la producción. Este marco legal idóneo nunca verá la luz a no ser que la administración, las industrias y los grupos ecologistas abandonen sus actuales planteamientos antagónicos y se unan para resolver los problemas comunes.

Ni siquiera con el advenimiento del ecosistema industrial, resultará siempre fácil decidir la mejor forma de asignar los recursos. Pensemos en el petróleo. Fuente de energía, es también materia prima esencial para la fabricación de productos químicos, plásticos y otros materiales. Algunos analistas han sugerido limitar su uso al de materia prima, abandonándolo como fuente de energía. Un argumento similar podría aplicarse al carbón para que sirviera de materia prima y no de combustible. En cuanto a los productos elaborados, se pueden quemar plásticos para producir energía, reciclarlos en nuevos productos o incluso reducirlos hasta sus componentes químicos, pero no está claro qué solución es la ideal. La resolución de estas cuestiones necesitará un análisis cuidadoso por parte de los "ecólogos industriales".

No se alcanzará de la noche a la mañana un ecosistema ideal, en el que se optimice el uso de energía, se limiten a su mínima expresión la contaminación y los residuos y tengan un papel económicamente viable, en el proceso de fabricación, todos los productos. La técnica actual resulta, en muchas ocasiones, inadecuada para esa tarea y nos faltan conocimientos para acotar debidamente los problemas. Las dificultades para establecer un ecosistema industrial son gigantescas, debido sobre todo a la complejidad que comporta armonizar el deseo de un desarrollo industrial global con las exigencias de seguridad que reclama el medio ambiente.

A pesar de todo, somos optimistas. Los incentivos industriales son evidentes: las empresas abaratarán los costes sin perder competitividad siempre que se ciñan a un método económico racional que justifique los costes globales y los beneficios. También están claras las ventajas que disfrutará la sociedad: la población podrá elevar su nivel de confort sin provocar daños ecológicos ocultos que degraden la calidad de vida a largo plazo. Recordando que el hombre y su técnica forman parte del mundo natural nos será más fácil imitar el comportamiento de los ecosistemas biológicos que mejor funcionan y construir otros, artificiales, que se puedan mantener a largo plazo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RESOURCE & ENVIRONMENTAL PROFILE ANALYSIS OF PLASTICS AND NONPLASTICS CONTAINERS. Robert G. Hunt y Richard O. Welch. Midwest Research Institute, 1974.

PLATINUM-GROUP METALS. J. Roger Loebenstein en *Mineral Facts and Problems*, U. S. Bureau of Mines Bulletin n.º 675, U. S. Department of the Interior. U. S. Government Printing Office, 1985.

THE MAKING, SHAPING, AND TREATING OF STEEL. Dirigido por William T. Lankford Jr., et al. Association of Iron and Steel Engineers, 1985.

TECHNOLOGY AND ENVIRONMENT. Dirigido por Jesse H. Ausubel y Hedy E. Sladovich. National Academy Press, 1989.

INPUT MANAGEMENT OF PRODUCTION SYSTEMS. Eugene P. Odum en *Science*, vol. 243, n.º 4888, págs. 177-182; 13 de enero de 1989.



Estrategias para un desarrollo económico viable

La economía mundial está gastando las reservas de capital ecológico más deprisa de lo que pueden reponerse. Sin embargo, el crecimiento puede reconciliarse con el respeto por la integridad del ambiente

Jim MacNeill

Desde 1900, la población del planeta ha venido aumentando hasta triplicarse con creces. La economía mundial se ha multiplicado por 20. El consumo de combustibles fósiles es hoy 30 veces mayor que entonces, y ha sido 50 el factor de incremento de la producción industrial. Cuatro quintas partes de este crecimiento han ocurrido desde 1950. Tal escalada del desarrollo ha llenado el mundo de nuevas realidades que aún no se reflejan en la conducta humana, ni en la política, ni en la economía, ni en las instituciones de gobierno.

Los logros en bienestar social posibilitados por este desarrollo han sido impresionantes, y lo es más todavía su potencial de futuras mejoras. Pero muchos de los procesos desarrollísticos que reportaron tales logros están degradando el ambiente del planeta y esquilmando su capital ecológico básico a un ritmo alarmante, empobreciendo y sumiendo en la miseria a crecientes masas de población. Una década después del hito que supuso la Conferencia sobre el Medio Ambiente celebrada en 1972 en Estocolmo, los gobiernos comenzaron a reconocer que la destrucción del entorno, efectuada a un ritmo y a una escala como nunca se habían conocido con anterioridad, podía dar al traste con las perspectivas de desarrollo económico y era una grave amenaza contra la supervivencia misma de los habitantes de la tierra.

¿Hay algún modo de satisfacer las necesidades y aspiraciones de los cinco mil millones de seres humanos que viven actualmente en la tierra, sin comprometer a la vez la capacidad de que satisfagan también las suyas los que, en número de ocho a diez mil millones, la habitarán un mañana próximo? Esta creo yo que fue la pregunta tácita a la que trató de responder la Asamblea General de las Naciones Unidas cuando, en 1983, pidió que se estableciera una comisión especial e independiente. La Comisión Mundial para Ambiente y Desarrollo, como después se la llamó, estaba formada por 23 miembros, que procedían de 22 países, con equilibrio entre las diversas zonas, pues se incluían todos los de los principales grupos de poder y eran fuerte mayoría los países que se hallan en vías de desarrollo. Gro Harlem Brundtland, a la sazón jefe de la oposición y hoy primera ministra de Noruega, presidía la Comisión; Mansour Khalid, antaño ministro de relaciones exteriores del Sudán, ocupaba la vicepresidencia. A mí me correspondió (ex officio) ser miembro y secretario general. con las responsabilidades de organizar y dirigir lo que llegó a convertirse en una encuesta global sobre la situación del mundo.

La comisión pasó por un largo proceso de análisis, aprendizaje y debates. Encargamos estudios, establecimos secciones y grupos de trabajo e invitamos a reunirse con nosotros a personajes de renombre mundial. Hicimos también algo que ninguna otra comisión internacional ha intentado: organizamos conferencias y coloquios públicos abiertos por todo el mundo, de Jakarta a Moscú, de São Paulo a Oslo, de Harare a Otawa. Entrevistamos, en demanda de sus opiniones, a cerca de un millar de expertos, líderes políticos y ciudadanos preocupados por el tema en los cinco continentes. En este proceso, adquirimos un conocimiento de primera mano sobre las contradicciones que se dan entre la realidad del ambiente y del desarrollo —totalmente interconectados en la vida diaria de las gentes, de las comunidades y de las industrias— y los artificiales distingos que suelen levantar entre uno y otro las instituciones académicas, económicas y políticas.

En octubre de 1987, después de tres años de intenso trabajo, la comisión presentó su informe "Nuestro futuro común", a la Asamblea General. Su respuesta a la pregunta tácita de la Asamblea fue un muy condicionado "Sí". Las necesidades y aspiraciones de hoy podrían conciliarse con las de mañana a condición de que las naciones cambiaran radicalmente el modo de dirigir la economía mundial. Aunque este artículo se basa principalmente en el informe de la comisión, refleja mi interpretación personal y tiene también en cuenta los sucesos que se han producido desde 1987 y la información recogida en los dos últimos años.

1. PEATONES EN LA AUTOPISTA, en Costa de Marfil. La estampa resume la coexistencia de lo viejo con lo nuevo que caracteriza a los países en vías de desarrollo. No todos los logros del desarrollo económico se hacen tan obvios. Muchos de los cambios que exigirá un desarrollo viable deberán acometerse con nuevas medidas sobre regulación, subsidios y división de las responsabilidades.

JIM MACNEILL es secretario general de la Comisión Mundial para el Ambiente y el Desarrollo. Dirigió la redacción del informe entregado por la Comisión en 1986 con el título de *Nuestro futuro común*. Antes de formar parte del citado grupo [World Commission on Environment and Development, WCED] fue durante siete años director de la sección de problemas del ambiente en la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo; con anterioridad trabajó como secretario permanente en el ministerio de asuntos urbanos del Canadá y como consejero especial para cuestiones sobre la constitución y el ambiente en la oficina del primer ministro Pierre E. Trudeau. Es presidente de MacNeill Associates y recientemente ha trazado un plan de desarrollo viable por encargo del Instituto de Investigación sobre la Gestión Pública de Ottawa.

Durante sus tres años de trabajo, la comisión se preguntó una y otra vez lo que yo llamo la "cuestión de la viabilidad": ¿Podrá el crecimiento, a la escala proyectada para el decenio próximo y los cuatro siguientes, llevarse adelante sobre una base que sea económica y ecológicamente sostenible?

La respuesta no es inmediata, puesto que los obstáculos contra la viabilidad son sobre todo sociales, institucionales y políticos. La viabilidad económica y la ecológica son tratadas aún por todos los gobiernos y organismos internacionales como dos cuestiones independientes, y son de la incumbencia de ministerios o departamentos distintos y separados: unos de economía o finanzas; otros, del medio ambiente. Lo cierto es que los sistemas económico y ecológico se hallan, de hecho, interconectados. El calentamiento del globo no es sino una forma de reacción del sistema ecológico general frente al sistema económico mundial. Y lo mismo cabe decir del agujero de la capa de ozono, de las lluvias ácidas sobre Europa y el este de Norteamérica, de la degradación del suelo de las praderas, de la deforestación y la extinción de especies en la Amazonía y de otros muchos fenómenos ambientales.

Algunas regiones y comunidades han atravesado ya los umbrales críticos. En el caso de la capa de ozono y del cambio climático puede que sea el mundo entero el que esté a punto de atravesarlos. Aun así, el imperativo más urgente de los próximos cinco decenios será el de aumentar la rapidez del desarrollo. Sería menester incrementar de cinco a diez veces la actividad económica durante los próximos 50 años para satisfacer las necesidades y aspiraciones de una población mundial que va en rápido aumento, así como empezar a reducir las bolsas de pobreza. Si tal pobreza no desaparece en proporción importante y pronto, no habrá manera posible de detener la acelerada disminución de las reservas planetarias de capital básico: de los bosques, suelos, especies, pesquerías, aguas y atmósfera de nuestro planeta.

Una transición hacia un desarrollo viable durante la primera parte del siglo próximo requerirá, como mínimo, un crecimiento anual del 3 por ciento en la renta per cápita de los países en vías de desarrollo y unas fuertes medidas orientadas a conseguir mayor equidad en esos países y menos diferencias entre ellos y los del mundo industrializado. Aunque sólo representan una cuarta parte de la población mundial, los países industrializados consumen alrededor del 80 por ciento de los bienes del mundo entero. Los países en vías de desarrollo, con tres cuartas partes de la población mundial, disponen de menos de una cuarta parte de esos bienes. Y el desequilibrio va aumentando de forma acelerada.

Multiplicar de cinco a diez veces la actividad económica supone añadir un colosal gravamen sobre la ecosfera. Imagínese lo que sumaría la inversión, por todo el planeta, en construcción de hogares, en transportes, en agricultura y en industria. Si se empleasen las formas de desarrollo ordinarias, sólo el gasto de energía tendría que multiplicarse por ocho para conseguir únicamente que los países subdesarrollados, con sus poblaciones actuales, alcanzaran los niveles de consumo de que goza el mundo industrializado. Y para los alimentos, el agua, la vivienda y demás servicios vitales podrían citarse factores parecidos.

Lo de aumentar la actividad económica multiplicándola por un factor entre 5 y 10 suena a monstruoso, pero, en virtud de un simple cálculo de interés compuesto, viene a representar una tasa de crecimiento anual que se queda tan sólo entre el 3,2 y el 4,7 por ciento. ¿Qué gobierno, del país que sea, desarrollado o por desarrollar, no aspira al menos a eso? En realidad, tales porcentajes apenas bastan para mantener el incremento de la renta al mismo ritmo al que se prevé que aumentará la población de los países en desarrollo.

Dadas las tendencias demográficas, un auge del 3 por ciento anual en la renta per cápita requeriría que la renta nacional conjunta creciese el 5 por ciento cada año en los países de Asia en vías de desarrollo, el 5,5 por ciento en los de Iberoamérica y el 6 por ciento en los de Africa y en los del oeste asiático. Durante las décadas de los años sesenta y setenta, muchos países de las citadas zonas avanzaron en esas proporciones.

Pero en el transcurso de los años ochenta el crecimiento se ha detenido casi del todo en la mayoría de los países en vías de desarrollo. Han padecido graves trastornos internos, no sólo económicos, sino también ecológicos y políticos. Y en muchos casos, con claras conexiones entre unos y otros. La población siguió aumentando hasta dejar muy atrás al crecimiento económico en la mayoría de estos países, y dos terceras partes de ellos sufrieron disminuciones de la renta per cápita, algunas de hasta el 25 por ciento. El deterioro de algunos parámetros del mercado, tales como los precios de las mercancías, que llegaron a ser sumamente inestables, el creciente proteccionismo en las economías de mercado más desarrolladas y la congelación de los créditos y de las ayudas se combinaron para obligar a que se atendiese a las crisis coyunturales más que al desarrollo a largo plazo.

El problema principal, sobre todo en Africa y en Iberoamérica, era y sigue siendo todavía el de la deuda externa [*véase la figura 2*]. La deuda acumulada por el conjunto de los países en vías de desarrollo suma actualmente alrededor de 1 billón de dólares; el pago de sus intereses se lleva cada año 60.000 mi-

Crecimiento, Distribución y Pobreza

¿A qué velocidad puede esperar un país en desarrollo ir eliminando la pobreza? La respuesta variará de un país a otro, pero un caso típico puede enseñarnos mucho. Consideremos, por ejemplo, una nación en la que la mitad de la población subsiste con un nivel de vida rayano en la miseria y donde la renta nacional se reparte como sigue: una quinta parte de los habitantes, los de más alto nivel, disfrutan del 50 por ciento de la renta; la siguiente quinta parte, de menos nivel, percibe el 20 por ciento; la siguiente quinta parte, descendiendo, el 14 por ciento; otra quinta parte, el 9 por ciento; y a la última quinta parte, la inferior de todas, le llega sólo el 7 por ciento. Este ejemplo representa bastante bien la situación de muchos países subdesarrollados y cuya renta es escasa.

Consideremos ahora dos escenarios para la distribución de los incrementos de la renta: uno en el que el 25 por ciento de la renta incremental de la quinta parte que forman los habitantes más ricos se redistribuye por igual entre el resto de la población, y otro en el que no hay ninguna redistribución. Para estos dos casos, el número de años que se tardará en hacer que la pobreza disminuya de un 50 a un 10 por ciento será entre 18 y 24 años si la renta per cápita crece anualmente un 3 por ciento, y entre 51 y 70 años si su crecimiento anual es de sólo 1 por ciento.

Así que, si la renta per cápita sube el 1 por ciento cada año,el tiempo requerido para eliminar la pobreza absoluta se prolongará bastante por el siglo próximo, tanto si se redistribuye la renta como si no. Para asegurar que el mundo vaya por buen camino hacia un desarrollo sostenible durante la primera parte del siglo próximo será necesario que la renta per cápita aumente como mínimo un 3 por ciento cada año y también que en los países en desarrollo se la distribuya con mayor equidad.

llones. El tradicional flujo neto de capitales desde los países industrializados a los que están aún en desarrollo cambió de sentido en 1982: actualmente se transfieren en dirección contraria más de 43.000 millones de dólares al año. Y esta cantidad es sólo la que contabiliza el Banco Mundial.

Por añadidura, las actuales formas de transacción hacen recaer en gran medida los costos ambientales de la totalidad del producto nacional bruto sobre las economías más pobres, las de los países en vías de desarrollo, basadas en la mera extracción de los recursos. Un estudio efectuado para la Comisión estimaba esos costos en aproximadamente 14.000 millones de dólares al año –más de un tercio anual de los caudales que fluyen en la otra dirección a título de ayudas para el desarrollo. Y esos 14.000 millones resultan de un cálculo a la baja, que incluye sólo los costos relacionados con la degradación del ambiente y no los que corresponden a la disminución de los recursos.

La mayoría de los países en vías de desarrollo, así como grandes zonas de muchos de los ya industrializados, basan sus economías en los recursos naturales [*véase la figura 4*]. Su capital económico consiste principalmente en reservas de recursos ambientales: suelos, bosques, pesquerías, especies de la fauna y de la flora, aguas y parques. Su desarrollo económico a largo plazo depende del mantenimiento, si no del aumento, de tales reservas y de que se amplíe su capacidad de servir de base a la agricultura, la silvicultura, la pesca, la minería y el turismo, para provecho local y para la exportación.

Durante los dos últimos decenios, los países más pobres del mundo subdesarrollado han padecido una gravísima merma de este capital. Hace sólo 40 años, en Etiopía, por ejemplo, un 30 por ciento de su superficie estaba cubierto de selva; hace 12 años el porcentaje había bajado a un 4 por ciento, y hoy quizá sea sólo del 1 por ciento. Hasta este siglo, las selvas de la India cubrían más de la mitad del país; hoy han disminuido hasta ocupar solamente el 14 por ciento, y cada día se van eliminando más deprisa. En los trópicos se talan 10 árboles por cada uno que se planta; en Africa la desproporción es de 29 a uno. Año tras año desaparecen áreas forestales cuya superficie total equivale a la del Reino Unido. Puede que sólo el Brasil esté perdiendo anualmente más de ocho millones de hectáreas.

Una superficie más extensa que todo el continente africano y habitada por más de mil millones de personas está amenazada hoy de desertización, y cada año aumentan los desiertos en seis millones de hectáreas. El Instituto para la Observación del Estado del Mundo (*WorldWatch Institute*) calcula que se pierden cada año hasta 25.000 millones de toneladas de mantillo o capa de tierra fértil –lo que viene a ser, más o menos, todo el que cubre las zonas cerealistas de Australia. El gasto de agua se ha duplicado por lo menos dos veces en este siglo y podría duplicarse otra vez en las dos décadas próximas. Sin embargo, en 80 países subdesarrollados, en los que vive el 40 por ciento de la población mundial, el agua es ya, por su escasez, un grave impedimento que frena el desarrollo.

El capital básico para la economía de los países en vías de desarrollo, y de parte de algunos desarrollados –sus recursos naturales y renovables–, está consumiéndose más deprisa que lo que se puede rehacer o reponer. Hay algunos países subdesarrollados que, habiendo agotado virtualmente todas sus reservas de capital ecológico, se hallan al borde de la quiebra ambiental. Entre las consecuencias que se siguen hay que contar no sólo el aumento del hambre y de la mortandad, sino también la inestabilidad social y los conflictos, puesto que el agotamiento de los recursos y la degradación del nivel de vida provoca que millones de refugiados crucen las fronteras nacionales.

DEUDA A LARGO PLAZO Y AFLUENCIAS FINANCIERAS EN LOS PAISES EN DESARROLLO DE 1983 A 1988 (Miles de millones de dólares)

	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Deuda pendiente y ya gastada	562,5	644,9	686,7	793,7	893,8	996,3	1020
Servicio de la deuda	98,7	92,6	101,8	112,2	116,5	124,9	131
Pagos principales	49,7	45,4	48,6	56,4	61,5	70,9	72
Pagos de los intereses	48,9	47,3	53,2	55,8	54,9	54,0	59
Afluencias netas	67,2	51,8	43,0	32,9	26,2	15,8	16
Transferencias netas	**18,2**	**4,6**	**-10,2**	**-22,9**	**-28,7**	**-38,1**	**-43**

2. DEUDA Y FLUJOS FINANCIEROS reflejan el empeoramiento de la situación económica de los países en vías de desarrollo. La deuda acumulada de esas naciones va en aumento, cifrándose hoy en más del billón de dólares. A partir de 1984 el flujo de capital cambió de sentido; hoy son 43.000 los millones de dólares que se transfieren de los países pobres a los desarrollados. Los datos nos los proporcionó el Banco Mundial.

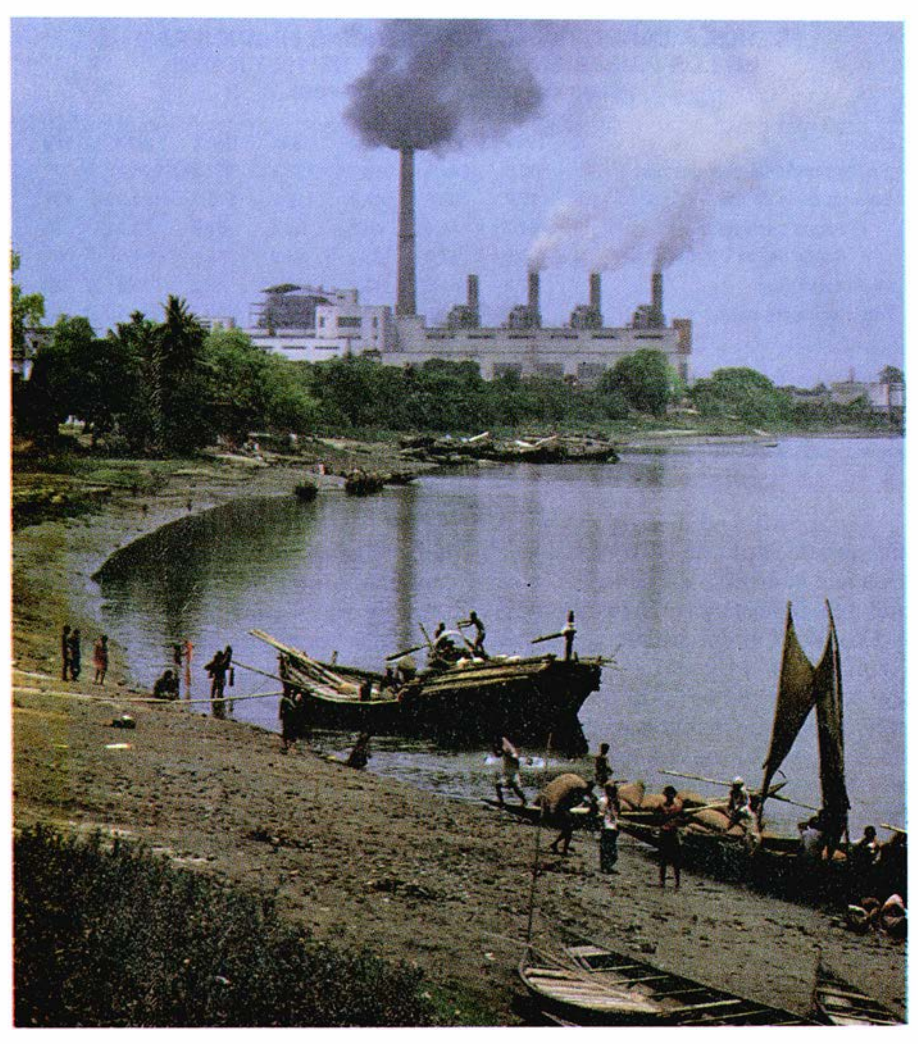
Con tales factores como telón de fondo, no es difícil predecir un futuro en el que la degradación ambiental, la pobreza y la penuria sean cada vez mayores, los recursos escaseen y crezca todavía más la contaminación. Este podría ser, desde luego, el amargo fruto de muchas políticas y pautas de desarrollo actuales; pero no es algo inevitable.

En vez de abundar en ello, la Comisión prefirió insistir en que es posible una "nueva era de crecimiento" –no del tipo de crecimiento hoy imperante, sino de un crecimiento viable, un crecimiento basado en formas y procesos de desarrollo que no socaven la integridad del ambiente del que dependen. La Comisión definió el desarrollo viable como aquel que abre nuevas vías de progreso económico y social que "satisfagan las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas propias".

El concepto de desarrollo viable no es nuevo. Como señala William D. Ruckelshaus en su artículo "Hacia un mundo viable", la viabilidad es la economía originaria de la especie. La civilización moderna, empero, se ha caracterizado por un desarrollo suicida, empleando formas de toma de decisión que provocan un olvido sistemático del futuro. ¿Pueden reestructurarse las economías modernas conforme con los criterios de la viabilidad? No es ésta una cuestión académica, sino probablemente una cuestión de supervivencia.

Esa reestructuración requerirá cambios en el sistema de valores y en las metas de la sociedad, cambios en los incentivos y cambios en los procesos que dominan la toma de decisiones. Para que el desarrollo sea viable se habrán de cumplir unas cuantas condiciones. Ya he mencionado algunas: reanimar el crecimiento, procurar muy de veras la equidad y satisfacer las necesidades y aspiraciones esenciales. Varias otras condiciones son igualmente importantes.

Una es la de reducir los índices de aumento de la población. Asunto que no es simplemente de cifras. El niño que nace en un país rico, industrializado, donde hay un alto consumo de energía y de materiales per cápita, representa para el planeta una carga mucho más pesada que el niño nacido en un país pobre. El mundo industriali-



3. EL RIO GANGES sufre la fatalidad que pesa sobre muchos recursos naturales: se ha llegado a contaminar por efecto de políticas económicas que sacrifican el medio ambiente en aras del desarrollo económico. El primer ministro Rajiv Ghandi ha iniciado un programa para limpiar y restaurar el río.

zado ha caído en la cuenta de que el mejor medio de control demográfico es el desarrollo. Junto con la urbanización, los niveles de ingresos en alza, las mejoras educativas y la habilitación laboral de la mujer, el desarrollo ha traído índices incluso negativos en cuanto al aumento demográfico de Alemania occidental y Suecia, entre otros países.

Procesos similares están teniendo lugar en algunos de los países que se hallan en vías de desarrollo. Además, muchos de ellos empiezan ya a adoptar fuertes medidas directas para motivar social, cultural y económicamente a las parejas para que tengan pocos hijos. Mediante programas de planificación familiar, están proporcionando también, a cuantos lo piden, la educación, los medios y los servicios técnicos necesarios para controlar el número de vástagos. Estos esfuerzos requieren mucho más apoyo investigador, financiero y sobre todo político de los países industrializados que el recibido hasta la fecha.

Otra condición esencial para que el desarrollo se torne viable es que la provisión de capital ecológico de una comunidad o de una nación no disminuya con el transcurso del tiempo. Una provisión constante o creciente de capital natural resulta indispensable no sólo para satisfacer las necesidades de las generaciones presentes, sino también para guardar las normas de la justicia y la equidad con respecto a las futuras.

¿Pueden las economías mundiales crecer a la vez que ir viviendo del interés que proporcione la reserva terráquea de recursos renovables, sin dilapidar ese capital? De momento, las economías mundiales están retrocediendo aceleradamente, pero la cuestión sigue abierta. Para que el consumo anual de la reserva terráquea de recursos renovables guarde proporción con la capacidad que tienen de generarlos los sistemas naturales, el mundo industrializado habrá de incrementar en muchos órdenes de magnitud su respaldo a cuantos planes se orienten a reducir la polución, proteger y preservar la provisión de recursos esenciales y restaurar y rehabilitar las riquezas naturales que ya han sido demasiado explotadas o esquilmadas.

Es mucho más importante, con todo, reformar los sistemas de administración pública que, activa aunque no intencionadamente, promueven la deforestación, la desertización, la destrucción del hábitat y de las especies naturales y el deterioro de la calidad del aire y de las aguas. Esta política, y los presupuestos ingentes que a menudo exige, es mucho más eficaz que todos los medios que se conciben y arbitran para proteger el ambiente o para restaurarlo y rehabilitarlo cuando se ha dañado. Mientras no se reformen tales políticas, las naciones serán incapaces de frenar, y menos aún de recuperar, el despilfarro cada vez mayor de su capital natural.

Tomemos, por ejemplo, la agricultura. Los subsidios agrarios constituyen uno de los casos más patentes de política económica destructiva sin quererlo. Virtualmente la totalidad del ciclo de la producción alimentaria en Norteamérica, Europa occidental y Japón atrae sumas ingentes en forma de subsidios directos o indirectos. Estos subsidios animan a los labradores a ocupar terrenos marginales y a roturar bosques. Inducen a los campesinos a emplear pesticidas y fertilizantes en exceso y a consumir en los riegos muchas aguas subterráneas y superficiales. Los agricultores canadienses sufren pérdidas anuales de más de 1000 millones de dólares por la incidencia negativa de la erosión en sus cosechas, la cual proviene, a su vez, de unas prácticas que los contribuyentes canadienses suscriben.

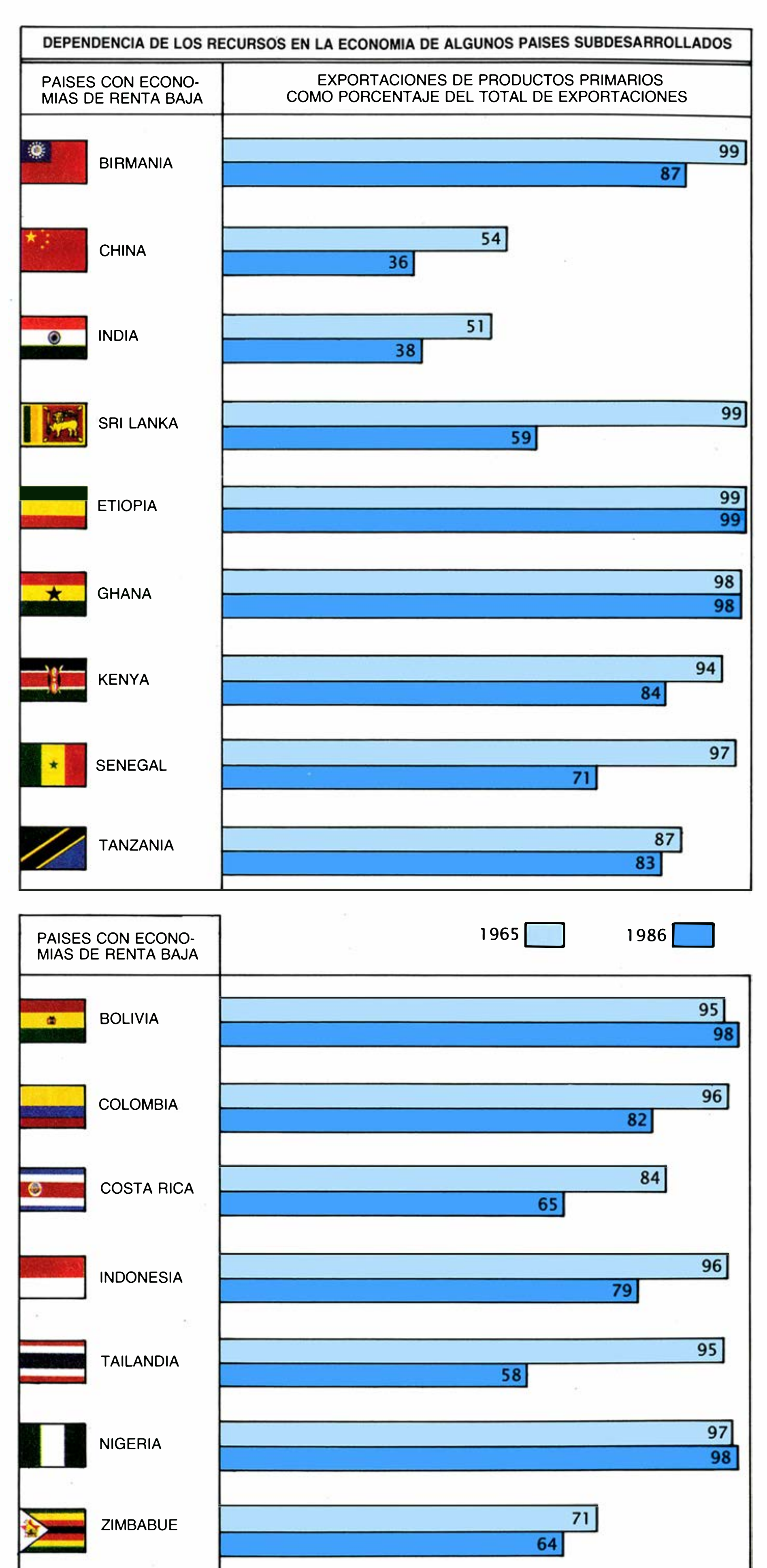
Según datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y de otras fuentes, la política de subsidios agrarios les está costando a los gobiernos occidentales más de 300.000 millones de dólares al año. ¿Qué programas de conservación pueden competir con éste? Esos subsidios son para los agricultores un incentivo mucho más fuerte y atractivo que las pequeñas subvenciones que suelen concederse para la conservación del suelo y del agua.

Los contraproducentes efectos de tales subsidios traspasan las fronteras nacionales. Al generar enormes excedentes a un elevado precio económico y ecológico, los subsidios originan presiones políticas en pro de más subsidios aún: para incrementar las exportaciones, para la donación de alimentos como ayuda rutinaria a países subde-

sarrollados y para establecer barreras comerciales que impidan la importación de productos alimenticios. Todas estas medidas perjudican a la productividad agrícola.

Durante los próximos decenios, la producción agrícola deberá trasladarse de los países desarrollados a los países por desarrollar, donde la demanda va en aumento. La reforma agraria y de los precios está ayudando a que la agricultura cobre bríos en algunos países de Asia, Africa e Iberoamérica, pero esos esfuerzos podrían ser fácilmente inutilizados por la competencia desleal de los excedentes occidentales subvencionados. Los gobiernos de los países subdesarrollados raras veces son capaces de resistirse a las ayudas o las donaciones en forma de alimentos subvencionados. Pues, aparte de que alivian una necesidad siempre actual, reducen las presiones políticas que recaen sobre los mismos gobiernos para que reformen sus propios sistemas agrícolas, muchos de los cuales son igualmente perjudiciales. Son los agricultores quienes han de soportar la mayor parte de las consecuencias de la pasividad resultante. Hasta los más eficientes son incapaces de competir con excedentes ofrecidos a precios artificialmente bajos gracias a los subsidios que premian la exportación.

Estas políticas no son viables. En vez de enviar "ayuda" rutinaria en forma de excedentes agrícolas, los países desarrollados deberían proporcionar asistencia financiera, de suerte que promoviesen y apoyasen las reformas internas esenciales para aumentar la producción y poner fin a la febril degradación de los recursos básicos en los países subdesarrollados, cambiando así de rumbo y dando alas a sus economías. Las políticas agrarias y las correspondientes políticas comerciales de los países desarrollados pueden también replantearse y redistribuir los presupuestos destinados a la agricultura nacional e internacional, de manera que no sólo mantengan la renta agraria –lo que es vital para una agricultura viable– sino que animen también a los agricultores a mejorar, más que a es-



4. DEPENDENCIA DE LOS RECURSOS en las economías de los países subdesarrollados. Salta a la vista, en esta selección, con sólo advertir el porcentaje de "productos primarios" que hay en el total de sus exportaciones: combustibles, minerales, metales y productos agrícolas. En muchos casos, el porcentaje ha ido disminuyendo a lo largo de las dos últimas décadas, a medida que los recursos se agotaban. Datos del Informe del Banco Mundial sobre el Desarrollo Mundial en el año 1988.

quilmar, el suelo y el agua subterránea. En Norteamérica existen modelos de tales políticas desde los años treinta, cuando el Servicio de Conservación del Suelo de los EE.UU. y la Administración para la Rehabilitación de Labrantíos y Praderas en el Canadá tomaron el control de los terrenos erosionables. La Ley de Seguridad Alimentaria estadounidense del año 1985 es un ejemplo más reciente del tipo de cambios que están haciendo falta.

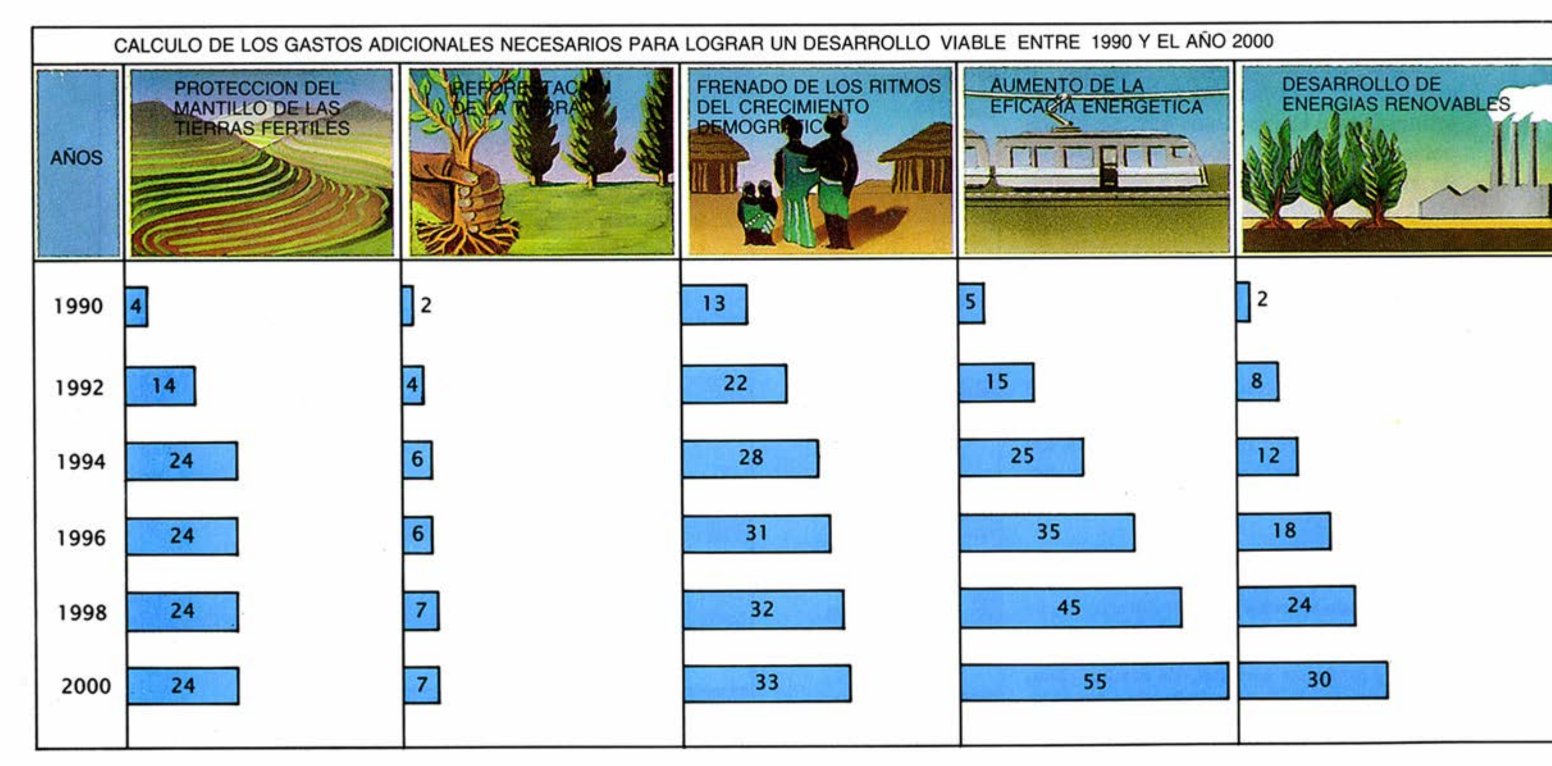
Las políticas gubernamentales de los países desarrollados y de los retrasados incentivan con similar intensidad la explotación sin medida de las zonas forestales del mundo. En el Brasil, el contribuyente respalda el que se aniquilen las selvas de la Amazonía, lo mismo que el contribuyente de los Estados Unidos se halla tal vez a punto de suscribir el desmonte del Tongass, el gran bosque húmedo de Alaska. Contumaces incentivos que fomentan la excesiva explotación tanto de los bosques de las zonas templadas como de las selvas tropicales se hallan también presentes en el mercado mundial de productos forestales. Si semejantes políticas e incentivos se siguen ejerciendo, acabarán probablemente destruyendo la mayoría de las regiones arboladas que aún quedan en el mundo, con las consecuentes implicaciones en la seguridad de nuestra alimentación, desertización, inundaciones y calentamiento del globo terráqueo.

Otra condición esencial más para que el desarrollo sea viable concierne a la naturaleza de la producción. Si se han de mantener índices de crecimiento de hasta un 3 o un 4 por ciento en los países desarrollados y de hasta un 5 o un 6 por ciento en los subdesarrollados, habrán de reducirse bastante y con rapidez la energía y la cantidad de materia prima requerida en cada unidad de producción.

Durante los dos últimos decenios, los cambios económicos y técnicos han dado por resultado una estabilización o una franca reducción de la demanda energética y de algunos materiales básicos por unidad de producto. También se ha debilitado el lazo que ataba el crecimiento y su repercusión sobre el medio ambiente. En ningún otro sector se ha hecho esto tan notorio como en el energético. Tras la primera crisis del petróleo, entre 1973 y 1983, las 24 naciones de la OCDE, todas ellas desarrolladas, aumentaron su productividad energética en un promedio del 1,3 por ciento anual. Antes de la última crisis del crudo, cuando los precios cayeron en picado, algunos países, entre los que se contaban Japón y Suecia, habían alcanzado aumentos de su productividad de más de un 2 por ciento al año. Las mismas tendencias pueden señalarse en muchas otras áreas: agua, acero, aluminio, cemento y determinados productos químicos.

La transición hacia el empleo de materiales reciclados forma parte integrante de la limitación en el gasto de materias primas; transición que está ya bastante adelantada en algunos países. Durante el decenio 1975-1985, Austria, Alemania occidental, Japón, Suecia y algunos otros países obtuvieron importantes logros en el reciclado de aluminio, acero, papel y vidrio. Las ganancias potenciales siguen siendo, con todo, enormes, aunque sólo sea porque a la mayoría de los países y de las industrias les queda mucho camino por recorrer hasta ponerse a la altura de los que van en cabeza. Si en Canadá, por ejemplo, se reciclara el papel de periódico como se hace en Japón, podría ahorrarse 80 millones de árboles cada año: unas 40.000 hectáreas de bosque.

Cuando una industria reduce el contenido energético y material de su producto, consigue un ahorro en los costes generales por unidad de producción y frena también sus emisiones contaminantes y destrozos ambientales. En realidad, este es a menudo un remedio mucho más eficaz de reducir los desechos que las costosas técnicas "de boca de desagüe", que no sirven para ninguna otra cosa. Los beneficios que reportan al ambiente la reducción y el reciclaje de los recursos utilizados como materias primas redundan también sobre el comienzo mismo del ciclo de producción. Se manifiestan en la disminución de las explotaciones mineras y de los desperdicios que generan, en el menor consumo y contaminación de las aguas, en la menor contaminación del



5. COSTE DE UN DESARROLLO VIABLE en 10 años, estimado por el WorldWatch Institute. El informe abarca gastos para reducir la velocidad del aumento de población y para restaurar y conservar los recursos naturales en todo el globo. Compárense estas cifras con las de los gastos militares del

aire y en una menor erosión y deforestación.

Un aumento entre el 1 y el 2 por ciento anual en la productividad energética podría aliviar el calentamiento del globo terráqueo y daría lugar a importantes reducciones de la lluvia ácida. Las naciones podrían lograr fácilmente esos incrementos de la productividad energética si, mediante controles de precios y otras medidas, fomentasen el rendimiento con el mismo vigor con que procuran el desarrollo de los suministros convencionales. Y podrían hacerlo sin sacrificar el rendimiento macroeconómico. De hecho, los países que ya han conseguido avanzar en esta dirección ocupan los puestos más altos en la escala internacional de las realizaciones económicas. Entre 1973 y 1984, el contenido energético y de materias primas por unidad de producción disminuyó en la industria japonesa un 40 por ciento. Suecia, Alemania occidental y algunos otros países lograron porcentajes de reducción igualmente satisfactorios o mejores. Sacarle mayor rendimiento a la energía y a los recursos en las industrias o en las comunidades contribuye a que aumenten la eficiencia y la competitividad de la economía nacional.

Los países que se encuentran en vías de desarrollo no pueden ignorar tampoco las consecuencias que trae consigo el quedarse rezagados en la productividad energética, aprovechamiento de los recursos y protección del ambiente. Allí, lo mismo que en los países industrializados, el aumento de la productividad es urgente e imprescindible para mantener el crecimiento, aminorar la contaminación y afrontar la competitividad en el mercado internacional. Las economías de mercado desarrolladas deben continuar dirigiendo la marcha en lo que respecta a la reducción de energía y recursos y al reciclaje de materiales, pero los países subdesarrollados no deben perder el tren. Además, éstos deben abandonar las técnicas anticuadas, más costosas e ineficaces, en favor de las más avanzadas.

Algunos países que se han industrializado recientemente, como Taiwan, Corea del Sur y Brasil, están cayendo en la cuenta de esta necesidad y empiezan a incorporar, en sus estructuras industriales, técnicas punteras y procedimientos más refinados. Los países industrializados podrían habilitar ciertos procedimientos, en particular comerciales y de ayuda, para promover activamente el traspaso a los países subdesarrollados de procesos industriales y técnicas avanzadas que fueran más eficaces en términos energéticos y de recursos, menos contaminantes y, por tanto, más competitivos económicamente.

Algunos de los cambios que requieren los planes energéticos gubernamentales dan una idea de los que hacen falta en general para reducir el consumo de recursos y materiales que conlleva el crecimiento. Para incrementar a un ritmo sostenido el aprovechamiento energético, por ejemplo, los gobiernos tendrán que introducir cambios impopulares, por lo menos en tres áreas. En primer lugar, los países habrán de considerar el "mantenimiento de los precios", esto es, gravar con impuestos la energía durante los períodos en que los precios reales sean bajos para fomentar la productividad. Segundo, unas regulaciones más estrictas que exijan constantes mejoras en el rendimiento de aparatos y técnicas, desde los motores eléctricos hasta los acondicionadores de aire, en el diseño de edificios, automóviles y sistemas de transporte. Tercero, habrá que innovar necesariamente las instituciones para acabar con los monopolios de los proveedores y para reorganizar el sector energético, de manera que los suministros de energía puedan venderse competitivamente y con los menores costes.

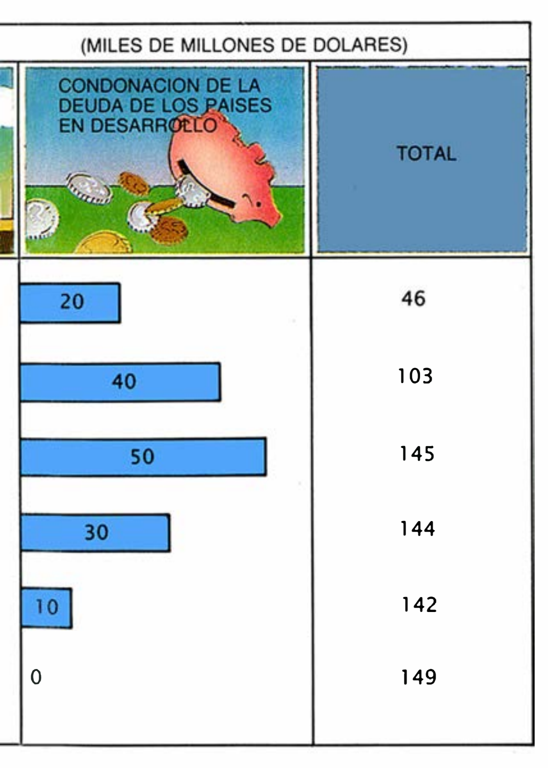
La restricción de la demanda a través del rendimiento energético permitiría ganar tiempo para desarrollar fuentes de energía renovables, entre ellas las que sustituyesen a la madera como combustible en los países subdesarrollados. La electricidad obtenida con placas solares, la energía eólica, las miniturbinas hidráulicas, el reciclaje de desechos orgánicos y el tratamiento de residuos orgánicos para fabricar gas y combustibles líquidos son, sólo, unas cuantas de las muchas técnicas de renovación energética con posibilidades prometedoras. Pero poner en marcha ese potencial requerirá cambios significativos en la investigación y el desarrollo, que habrán de dejar las fuentes de energía convencionales para ocuparse de otras nuevas.

Quede dicho una vez más que las actuales estructuras de subvención estatal promueven a menudo justo lo contrario de lo que se necesita para un futuro energéticamente viable. Ignoran los costos del agotamiento de los recursos naturales y del ensuciar la atmósfera, la tierra y el agua, favorecen el despilfarro y sólo prestan atención a las fuentes de energía tradicionales –carbón, petróleo y energía nuclear–, en vez de preocuparse por las renovables. Procediendo así, imponen enormes cargas a unos presupuestos ya muy gravosos y a las con frecuencia escasas reservas de divisas.

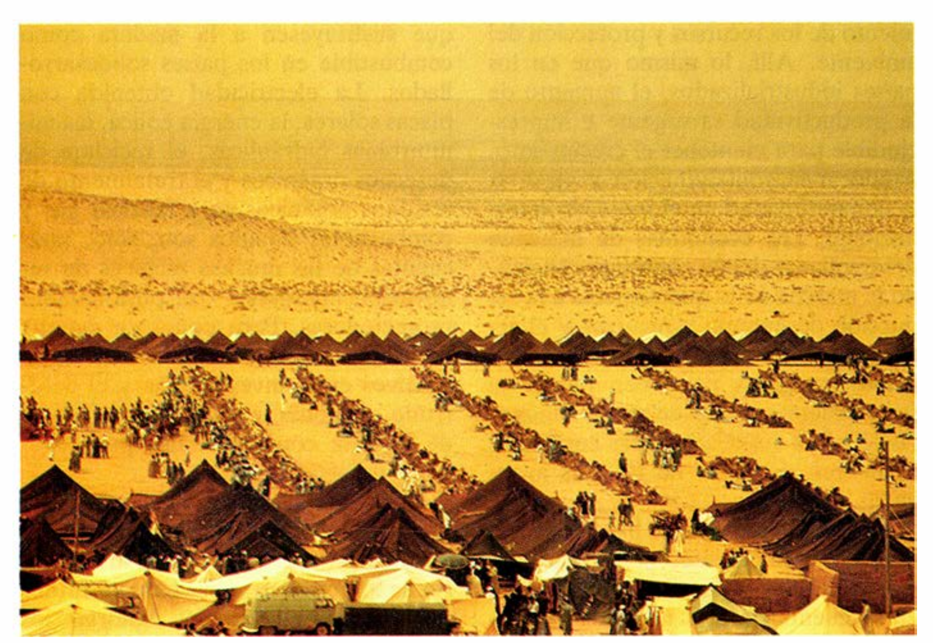
Los gobiernos deberían examinar todas las subvenciones, las más patentes y las encubiertas, y reformar cuantas comprometan la conservación y, en definitiva, la eficiencia. Deberían también suprimir las medidas que retardan el desarrollo de nuevos recursos energéticos renovables, sobre todo el de los combustibles que sirvieran como sustitutivos de la madera. Con unos incentivos apropiados, la industria misma podría desempeñar una función más eficaz.

La condición más importante para un desarrollo viable es que, al tomar decisiones, se atienda a la economía y al ambiente. Nuestros sistemas económicos y ecológicos han llegado a relacionarse íntimamente unos con otros en el mundo real, pero siguen estando separados casi por completo en nuestras instituciones.

Durante los años sesenta y setenta, los gobiernos de más de 100 países, desarrollados y subdesarrollados, establecieron organismos especiales para la protección del medio ambiente y para la administración de los recursos naturales. Pero a esos organismos los atenazaban las limitaciones de mandato y presupuestarias, así como su pequeña o nula influencia política. Entre tanto, los gobiernos no acertaban a responsabilizar a sus poderosos ministros y di-



mundo, que suman, considerados ellos solos, un montante próximo al billón de dólares de 1989.



6. CAMPO DE REFUGIADOS POR CAUSA DE LA SEQUIA en el Alto Volta. Nos ofrece una de tantas muestras de las difíciles situaciones en que se encuentran millones de seres humanos que se ven obligados a abandonar sus hogares por crisis del medio ambiente. Estos movimientos de grandes masas de población pueden crear tensiones internacionales cuando los refugiados cruzan las fronteras de las naciones.

rigentes económicos de las consecuencias que sus políticas y gastos tenían en el ambiente. El balance de fuerzas resultante estaba enormemente desajustado. Los organismos encargados del ambiente tenían más o menos las posibilidades de un provinciano aficionado a las carreras que, sin entrenamiento y sin respaldo financiero, tratase de emular una carrera de Carl Lewis. A pesar de las buenas intenciones, del esfuerzo y de algunos éxitos, se fueron quedando cada vez más rezagados.

A los organismos que velen por el ambiente se les deberá otorgar más capacidad y más poder para contrarrestar los efectos de unas políticas de desarrollo inviables. Y, sobre todo, los gobiernos deben tratar de que, sobre quienes dirigen la economía, el comercio y los sectores afines, recaiga directamente la responsabilidad de formular actuaciones y encauzar presupuestos que favorezcan un desarrollo congruente. Sólo entonces entrarán en consideración las dimensiones ecológicas de la política a la vez que sus dimensiones económicas, comerciales, energéticas y agrarias, en las mismas agendas y en las mismas instituciones nacionales e internacionales.

Un área donde la conjunción de los intereses ecológicos con la toma de decisiones económicas podría tener una honda repercusión es la de los incentivos mercantiles. El mercado es el más poderoso instrumento disponible para impulsar el desarrollo, y el que fomente y sustente o no esquemas de desarrollo viables o nefastos depende en gran parte de la política que lo dirija.

Como ya mencioné antes, la intervención del gobierno distorsiona a menudo el mercado de manera que lo encamina hacia un desarrollo inviable. Los incentivos fiscales y los impuestos, las medidas de control de precios y de mercados, las políticas de fijación de los tipos de cambio y el proteccionismo estatal son factores todos que influyen en el ambiente y en el consumo de recursos que acompaña al crecimiento. Pero los encargados de establecer esas políticas sólo en raras ocasiones se preocupan por las repercusiones que tendrán en el ambiente o en las reservas de capital ecológico. Y cuando los que acometen tales políticas tienen esas cosas en cuenta dan a menudo por supuesto, implícitamente, que los recursos son inagotables, o que se encontrarán sustitutos antes de que se agoten, o que el medio ambiente "debería" ser subsidiario del mercado. Lo mismo sucede con ciertas políticas sectoriales, verbigracia, las desacertadas subvenciones alimentarias y energéticas a las que antes me referí.

Es sorprendente que pocos gobiernos y dirigentes sociales se percaten de lo perniciosos que resultan, ecológica y económicamente hablando, los sistemas de incentivos creados por esas políticas, así como los presupuestos, con frecuencia descomunales, de que disponen. Hasta los fautores del movimiento ecologista se hacen sólo una vaga idea de ello. Los ecologistas han centrado su atención en los efectos del desarrollo económico en la salud, la propiedad y los ecosistemas. Rara vez han parado mientes en las políticas que subyacen tras ese desarrollo.

El presupuesto anual de una nación establece el cuadro de incentivos y frenos económicos y fiscales con que han de contar los dirigentes sociales, los hombres de negocios, los agricultores y los consumidores a la hora de tomar sus respectivas decisiones. Para el medio ambiente quizá sea ésta la directriz más importante de cuantas fijan los gobiernos cada año, pues el conjunto de todas las decisiones que de ella dependen mejorará o degradará el ambiente de la nación y aumentará o reducirá sus reservas de capital ecológico.

Tomando conciencia del asunto, no sería un obstáculo insalvable dar cuerpo a una política de cambio en los sistemas de incentivación. Algunos dirigentes de las industrias más avanzadas han acogido bien los análisis que vinculan los incentivos económicos con la integridad del ambiente. Con tal de que su renta no corra peligro, a los agricultores no pueden serles sino ventajosos los sistemas de incentivos que estimulen unas prácticas convenientes para la conservación y la mejora de sus tierras, sus bosques, sus aguas y otros elementos del capital agrícola básico. Para los consumidores, muchos de estos cambios en los incentivos no supondrían ni pérdida ni ganancia, mientras que su incidencia sobre el nivel de empleo podría ser incluso positiva.

La reforma de los sistemas de impuestos e incentivos, aunque de crucial importancia, no será suficiente. El mercado tiene diversos tipos de limitaciones, la más importante de las cuales es que no puede tomar en cuenta los costos ambientales externos asociados a la producción, el consumo y la disposición de los bienes y servicios. El mercado trata los recursos de la atmósfera, los océanos y los demás bienes comunes como si fueran gratis. Con ello "externaliza" o transfiere a la más amplia comunidad universal los costes que representan el inquinamiento del aire, del agua y de los terrenos, el ruido, la contaminación en general y, en fin, el agotamiento de los recursos naturales. La comunidad ha de cargar sobre sus hombros esos costes en forma de daños contra la salud, la propiedad y los ecosistemas.

Para integrar esos costes se requiere la intervención del gobierno. Un intento de lograrlo fue el denominado principio según el cual "el que contamina paga" (PPP, por sus siglas en inglés), implantado por los países pertenecientes a la OCDE en 1972. El PPP exige que las industrias paguen absolutamente todo lo que cueste proteger al medio ambiente de la contaminación resultante

de sus actividades industriales. Es éste un paso importante, sobre todo porque puede conseguir que los costes ambientales del desarrollo se reflejen en los precios que los consumidores abonan por los artículos, con lo que sus preferencias se irán decantando en favor de aquellos bienes cuya producción y cuyos desperdicios tengan menos repercusión sobre el ambiente. Por desgracia, los gobiernos han procedido a aplicar el principio con notoria lentitud, quizá porque encarece los productos y afecta al bolsillo del consumidor. Otra razón ha sido, sin duda, la presión de la industria. Aunque ésta suele ser una firme defensora del mercado, en este caso la reacción ha sido la de cerrar filas y unir sus fuerzas contra él.

La integración de los costes ambientales en los precios es un modo de procurar que se incluyan los costes reales del desarrollo a la hora de tomar decisiones económicas. Otra manera es incorporar las contabilidades de los recursos en los sistemas nacionales de contabilidad de la economía. Hoy por hoy, estos sistemas se preocupan principalmente por el curso de la actividad económica. Los cambios que puedan producirse en las reservas de capital ecológico son en gran parte ignorados. La integración de los dos factores capacitará a los gobiernos para determinar si un 3, 5 o 7 por ciento de incremento en el producto nacional bruto son cifras reales o si reflejan, por el contrario, un descenso análogo o mayor en las reservas de suelos, bosques, pesquerías, aguas, parques y lugares de interés histórico.

Contando con esta información, las tesorerías y los ministerios de hacienda podrían no sólo obtener un diagrama más exacto del estado de la economía, sino también hacerse alguna idea de cómo están repercutiendo las medidas económicas en los sistemas ecológicos. En Francia, Noruega, Canadá, EE.UU. y algunos otros países se ha estudiado ya la manera de contabilizar los recursos y crear sistemas de contabilidad integrada. La OCDE y varias instituciones independientes se dedican en la actualidad a proseguir esta tarea, por la que algunos organismos de países subdesarrollados han mostrado un vivo interés.

Con la gradual integración de la problemática del ambiente en la toma de decisiones económicas, los presupuestos energéticos, agrarios y de otros sectores deberán empezar a incluir partidas destinadas a cubrir los costes ambientales de sus respectivas actividades. Con el tiempo, la carga de la financiación de un desarrollo viable deberán asumirla esos presupuestos. En el ínterin, el desarrollo viable requerirá numerosas fuentes de financiación.

En particular, los países en vías de desarrollo necesitarán un sustancial aumento de las ayudas financieras. En 1988, el WorldWatch Institute hizo algunos cálculos aproximativos de lo que costaría alcanzar ciertas metas que estimaba esenciales para que, hacia el año 2000, se diese ya un desarrollo viable. Entre dichas metas se incluían la reducción del crecimiento demográfico, la protección del mantillo en los labrantíos, la repoblación forestal de la tierra, mayor rendimiento energético, desarrollo de energías renovables y condonación de la deuda de los países subdesarrollados [*véase la figura 5*].

Estimaba el Instituto que tales metas se podrían alcanzar mediante desembolsos anuales de unos 46.000 millones de dólares hacia 1990, aumentándolos paulatinamente hasta 145.000 millones en 1994 y hasta 150.000 en el año 2000. Para afrontar ese gasto ingente haría falta un vigoroso esfuerzo político. La proporción de tamaño esfuerzo acaso pueda juzgarse considerando la suma total con que los gobiernos han contribuido al Fondo para el Ambiente (PANU) que, dentro del Programa Ecológico de las Naciones Unidas, se estableció en la Conferencia de Estocolmo de 1972: solamente 30 millones de dólares cada año, que a veces han sido menos aún. En la reunión de este año del Consejo Rector del PANU, los gobiernos se avinieron sólo a incrementar sus aportaciones hasta los 100 millones de dólares. Todavía queda un largo camino por recorrer.

La deuda externa sigue siendo el problema más urgente al que se enfrentan los países pobres, en especial los de Africa e Iberoamérica. Deberá ser resuelto antes de que esos países acaben sucumbiendo bajo las presiones de la miseria y de la ruina económica y ecológica consiguientes. En la reunión que celebraron el año pasado en Berlín los dirigentes del Banco Mundial y del Fondo Monetario Internacional (FMI), daba la impresión de que más países que nunca estaban a punto de reconocer que la deuda era imposible de saldar. Aunque se han propuesto varios planes para aligerar la deuda (el más reciente, el Plan Brady en EE.UU.), todos ellos comparten dos rasgos sospechosos: el del tipo de medidas que imponen normalmente como condición para los empréstitos adicionales y la total falta de programas para la conservación, no digamos ya para el incremento, del capital de recursos naturales con que cuentan los países subdesarrollados.

El estricto condicionante impuesto por el Banco Mundial y por el FMI parece despreciar en ocasiones las consecuencias sociales y de otro tenor que se seguirían de las medidas económicas y fiscales requeridas. En concreto, los programas de reajuste estructural, que es como se conoce a esas medidas, no han tenido para nada en cuenta su posible repercusión sobre los recursos ambientales y ecológicos del país en cuestión. Las medidas encaminadas a reducir los déficits presupuestarios inciden, con frecuencia de forma desproporcionada, sobre tales recursos. Por si les faltara poco para hundirse en la miseria, las economías basadas en los recursos naturales se ven obligadas a gastar aún más deprisa su capital ecológico para obtener divisas, con las que se les exige que paguen su deuda. Los programas concebidos para restaurar la capacidad productiva de los entornos depauperados y esquilmados y para preservar de la destrucción los hábitats, las reservas genéticas y las zonas turísticas se recortan o lisa y llanamente no se cumplen. Las políticas que exigen a las industrias y a los gobiernos locales la introducción de medidas de control de la contaminación y unos planes orientados al suministro de aguas limpias, alcantarillados e instalaciones sanitarias, cuando no caen en saco roto tampoco se acometen con rigor.

Un estudio llevado a cabo recientemente por el Banco Mundial confirma que los programas de reajuste estructural no son neutrales por lo que respecta a sus implicaciones en los recursos ambientales. Pero es más significativo lo que este estudio demuestra: que se pueden idear programas cuyas consecuencias sean positivas antes que negativas para el medio ambiente de la nación. Hasta que esto suceda, las consecuencias ambientales del ajuste estructural seguirán constituyendo un motivo de preocupación. Varios países han dado instrucciones a sus representantes en las juntas del Banco Mundial y del FMI para que exijan que las implicaciones ambientales de sus programas entren a formar parte integrante de los estudios de fondo de todos los proyectos y en las negociaciones para la puesta en práctica de los programas.

El acopio de un fondo suficiente para que el desarrollo resulte viable requirirá iniciativas originales. El Instituto de Recursos Mundiales está realizando un estudio sobre la viabilidad de un programa o plan especial bancario de conservación internacional vinculado al

Banco Mundial. Ese nuevo medio podría proporcionar empréstitos y facilitar los arreglos financieros necesarios para la protección y el desarrollo congruente de hábitats y ecosistemas que se hallen en estado crítico, e incluso establecer acuerdos de alcance internacional. Hay también varias fuentes internacionales de ingresos cuyas posibilidades convendría tantear con miras a la finaciación de las actividades de apoyo a un desarrollo viable. Por ejemplo, se podría gravar con impuestos el uso de los bienes comunes internacionales o el tráfico de determinadas mercancías. Esto quizá parezca por ahora políticamente ilusorio, pero lo cierto es que, como se sabe, las tendencias generales transforman las realidades políticas. De hecho, puede que ya esté sucediendo algo parecido.

En junio de 1988, durante la conferencia mundial sobre la atmósfera que se celebró en Toronto por invitación del gobierno canadiense, los asistentes pidieron a los gobiernos que establecieran un Fondo Mundial para la Atmósfera, cuya financiación se conseguiría, en parte, mediante un impuesto de "protección del clima". Los ingresos se obtendrían gravando el consumo de combustibles fósiles en los países industrializados; las sumas así obtenidas se destinarían a los países subdesarrollados para ayudarles a adaptarse y a limitar las consecuencias del calentamiento del globo y de la elevación del nivel del mar. Otros han propuesto que ese impuesto sea proporcional al contenido de carbono de los carburantes. Más recientemente, el gobierno noruego ha propuesto que, como punto de partida, los países industrializados contribuyan a formar ese fondo con el 0,1 por ciento de su producto nacional bruto. En el presupuesto holandés se incluyó una partida de 250 millones de guilders destinado a una fundación encargada de velar por el clima global, y el gobierno está estudiando actualmente varias opciones relativas a la financiación y administración de tal fondo, en preparación de una conferencia internacional que tendrá lugar este otoño en La Haya.

Los gastos militares representan también un enorme acervo de capital, de potencial humano y de recursos naturales. Las naciones se están gastando cerca de 1 billón de dólares al año en seguridad militar –más de 2700 millones de dólares al día. Los países en vías de desarrollo han quintuplicado sus presupuestos de armamento en los últimos 20 años. Algunos de ellos están gastando más en su aparato militar que en educación, salud, bienestar y ambiente, todos juntos.

Una gran proporción de dichos gastos podría muy bien destinarse a fines más productivos. Esto requeriría una mayor conciencia de la creciente escalada de las amenazas ambientales contra la seguridad nacional y regional, conciencia de la que algunos líderes políticos están empezando a dar pruebas. Requeriría también un nuevo y más amplio concepto de la seguridad, un concepto que abarcase la seguridad ambiental junto con la económica y la política. Con una visión más panorámica, las naciones no tardarían en comprender que, en muchos casos, su seguridad podría reforzarse destinando inversiones a proteger, preservar y restaurar las reservas del capital ambiental básico, en vez de gastarse el dinero en armas.

La posibilidad de una guerra nuclear representa, sin duda, el más grave peligro potencial para los recursos ambientales, los sistemas de conservación de la vida y la supervivencia misma. Pero también son gravísimas las implicaciones geopolíticas del cambio de los factores económicos y ecológicos, tan estrechamente interconectados. En diversas zonas de Oriente Medio, Africa, Iberoamérica y Asia, el avance incontenible de los desiertos, la lucha por el agua y los movimientos de refugiados ecológicos son ya fuentes significativas de inestabilidad política y de tensión internacional. Estas situaciones no harán sino empeorar. El mero cambio climático elevará la tensión, dado que las mayores alteraciones ocurren en los límites de las naciones definidos por masas de agua, en los centros de producción urbanos y agrarios, así como entre las multitudes de refugiados ecológicos.

La amenaza que para la paz y la seguridad de las naciones y regiones supondría la quiebra del medio ambiente es potencialmente más grave que cualquier amenaza previsible de guerras con armamento convencional. Pues si de esta última amenaza se derivase alguna acción militar efectuada por potencias hostiles, no habría nación o grupo de naciones que dejara de responder a tal riesgo con una masiva movilización de todos sus recursos militares, diplomáticos y del tipo que fuesen. En cambio, ante una amenaza contra la seguridad universal y en forma de destrucción del ambiente, las naciones y la comunidad mundial en conjunto parecen incapaces de ofrecer una respuesta eficaz.

Los países deben empezar a tratar la integridad del medio ambiente y la viabilidad del desarrollo como una cuestión de política exterior de la máxima importancia. Las medidas que se arbitren para reducir la deuda externa y aumentar la afluencia neta de recursos a los países en desarrollo deberán ser respaldadas con coherentes políticas de ayuda, agraria y de mercado, así como a la importación o la exportación de productos químicos peligrosos, residuos y tecnología. Una "política exterior para el medio ambiente y para el desarrollo" podría contribuir a que en estas áreas se trabajase con mayor coherencia. Serviría también para aumentar en general la eficacia, la coordinación y la cooperación con miras a una aceleración de los desarrollos concernientes a la administración de los bienes comunes a todos los hombres –los océanos, la atmósfera, la Antártida y el espacio exterior.

Se halla en rápido auge el potencial de conflictos redundante del calentamiento del globo y la subida del nivel de los mares, el avance de la desertización, el reparto de las aguas y de otros recursos escasos, así como acerca de otras cuestiones sobre el ambiente. Pero, si se enfocasen certeramente dentro del contexto de la necesidad de un desarrollo económico viable, estas cuestiones suscitarían un nuevo espíritu de cooperación internacional e inspirarían renovadoras concepciones y planteamientos multilaterales para solucionar otros problemas que a todos nos atañen.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENERGY FOR DEVELOPMENT. Jose Goldenberg, Thomas B. Johannson, Amulya K. N. Reddy y Robert H. Williams. World Resources Institute, 1985.

OUR COMMON FUTURE. World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, 1987.

THE FOREST FOR THE TREES? GOVERNMENT POLICIES AND THE MISUSE OF FOREST RESOURCES. Dirigido por Robert Repetto. World Resources Institue, 1988.

STATE OF THE WORLD 1988. L. R. Brown et al. W. W. Norton & Company, 1988.

STRUCTURAL CHANGE AND ENVIRONMENTAL POLICY: EMPIRICAL EVIDENCE ON THIRTY-ONE COUNTRIES IN EAST AND WEST. Udo E. Simonis et al. Science Centre, 1988.

WORLD RESOURCES 1987-88 (AND 1988-89): AN ASSESSMENT OF THE RESOURCE BASE THAT SUPPORTS THE GLOBAL ECONOMY. World Resources Institute/International Institute for Environment and Development. Basic Books, 1988.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT: ECONOMICS AND ENVIRONMENT IN THE THIRD WORLD. David Pearce, Edward Barbier y Anil Markandya. Edward Elgar Publishing Ltd., en prensa.

Hacia un mundo viable

¿Qué políticas pueden hacer cambiar de conducta –a los individuos, a las industrias y a los gobiernos– para que el desarrollo económico y el aumento de población no sobrepasen los límites fijados por los imperativos ecológicos?

William D. Ruckelshaus

La dificultad de convertir los descubrimientos científicos en acción política está en función de la limitación de nuestros conocimientos y de las penalidades que la acción genera. Ante la débil firmeza de lo que sabemos a propósito de tan sólo uno de los aspectos de la crisis general por la que atraviesa el medio ambiente –el pronosticado aumento de los gases del efecto de invernadero en nuestra atmósfera– y dado el enorme esfuerzo técnico y social que hará falta para controlar ese aumento, no resulta difícil decir que el responder con éxito a la polifacética crisis será ardua empresa política. Supone, en efecto, nada menos que tratar de conseguir que una importante proporción de la población mundial cambie de conducta para poder alejar (quizás) amenazas que, de lo contrario, afectarán (probablemente) a un mundo que la mayoría de dicha población no llegará a ver.

Los modelos en que se basan, por ejemplo, las predicciones de un cambio climático son susceptibles de diversas interpretaciones en cuanto al tiempo en el que se produzca, su distribución por la Tierra y la gravedad de los cambios que comporte. Además, mientras tales modelos quizá convenzan a los científicos, que entienden sus supuestos y sus limitaciones, los presagios resultan, por lo general, poco influyentes en política. A las gentes –incluidos los grupos de personas que forman los gobiernos– les cuesta mucho cambiar de proceder para evitar peligros que, acaso, no se presenten en mucho tiempo o que pudieran incluso no llegar a presentarse.

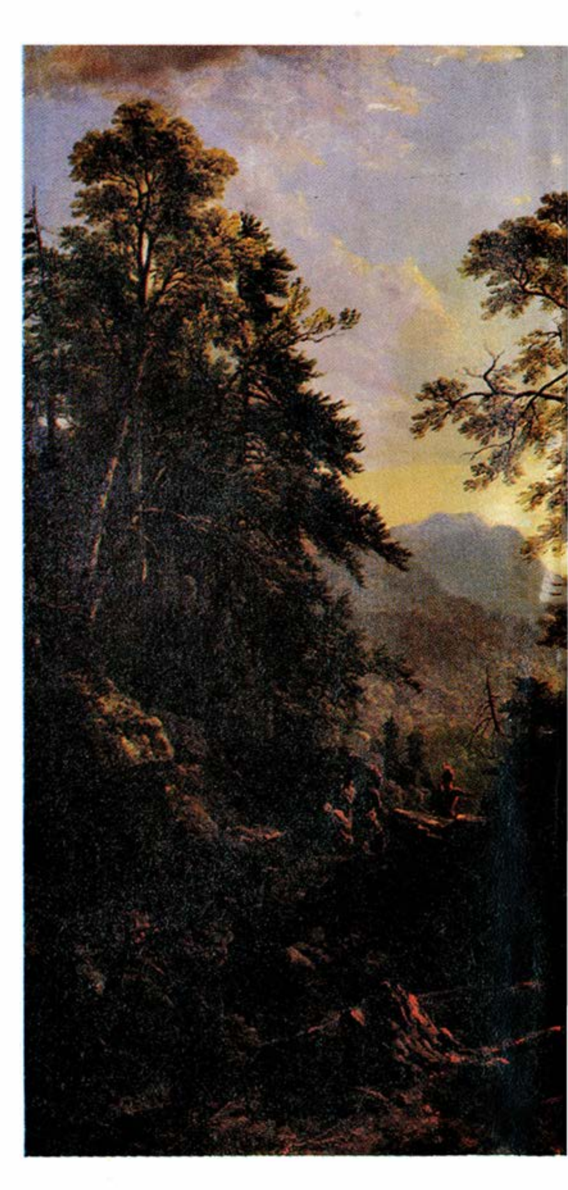
¿Cómo, pues, podremos provocar dicho cambio? Los anteriores artículos de este número monográfico han documentado suficientemente la realidad de la crisis ecológica mundial y han sugerido algunas medidas concretas para mitigarla. Este artículo versa sobre cómo crear las políticas, trazar los programas y aprovechar los recursos de tal modo que se lleguen a adoptar esas medidas y que las personas corrientes del mundo entero se convenzan de que hay que empezar a hacer las cosas de una manera diferente.

La contratación de un seguro es la forma en que, de ordinario, la gente se ocupa de las contingencias potencialmente graves, por lo que aquí viene también a cuento. La gente considera prudencial ir pagando las primas del seguro, de suerte que, si ocurre una catástrofe, ellos o quienes de los suyos les sobrevivan salgan del trance mejor librados que si no hubiese habido ninguna previsión. La analogía es clara. Los recursos que se consumen o gastan para impedir el aumento de los gases que generan el efecto de invernadero son una especie de prima de seguro. Por otra parte, todo el tiempo que vamos a estar pagando primas, podríamos también pagarlas de manera que nos reportasen dividendos, en forma de mayor eficacia, mejoras de la salud humana o más amplia distribución de la prosperidad. Si resultara que nos equivocábamos en cuanto al calentamiento de invernadero o la pérdida de ozono, aún nos quedaría el beneficio de los dividendos. En cualquier caso, nadie va a quejarse o a demandar a la compañía de seguros cuando el desastre no se produce.

Este es el argumento en pro de algunas acciones modestas e inmediatas.

WILLIAM D. RUCKELSHAUS es director ejecutivo de Browning Ferris Industries, Inc. Fue gerente de la Oficina para la Protección del Ambiente (EPA), desde 1970 hasta 1973, y de nuevo desde 1983 hasta 1984; perteneció también a la Comisión Mundial para el Ambiente y el Desarrollo. Graduado por la Universidad de Princeton y por la facultad de derecho de Harvard, ha sido diputado y fiscal general de Indiana y de los EE.UU. y ha ocupado el cargo de director de la Oficina Federal de Investigación (FBI).

Ruckelshaus agradece la importante contribución de Michael A. Gruber, analista política de la EPA, en la preparación de este artículo.



1. COEXISTENCIA de las actividades humanas con la naturaleza recogida en este cuadro que lleva por título *Progreso*; lo pintó Asher B. Durand en

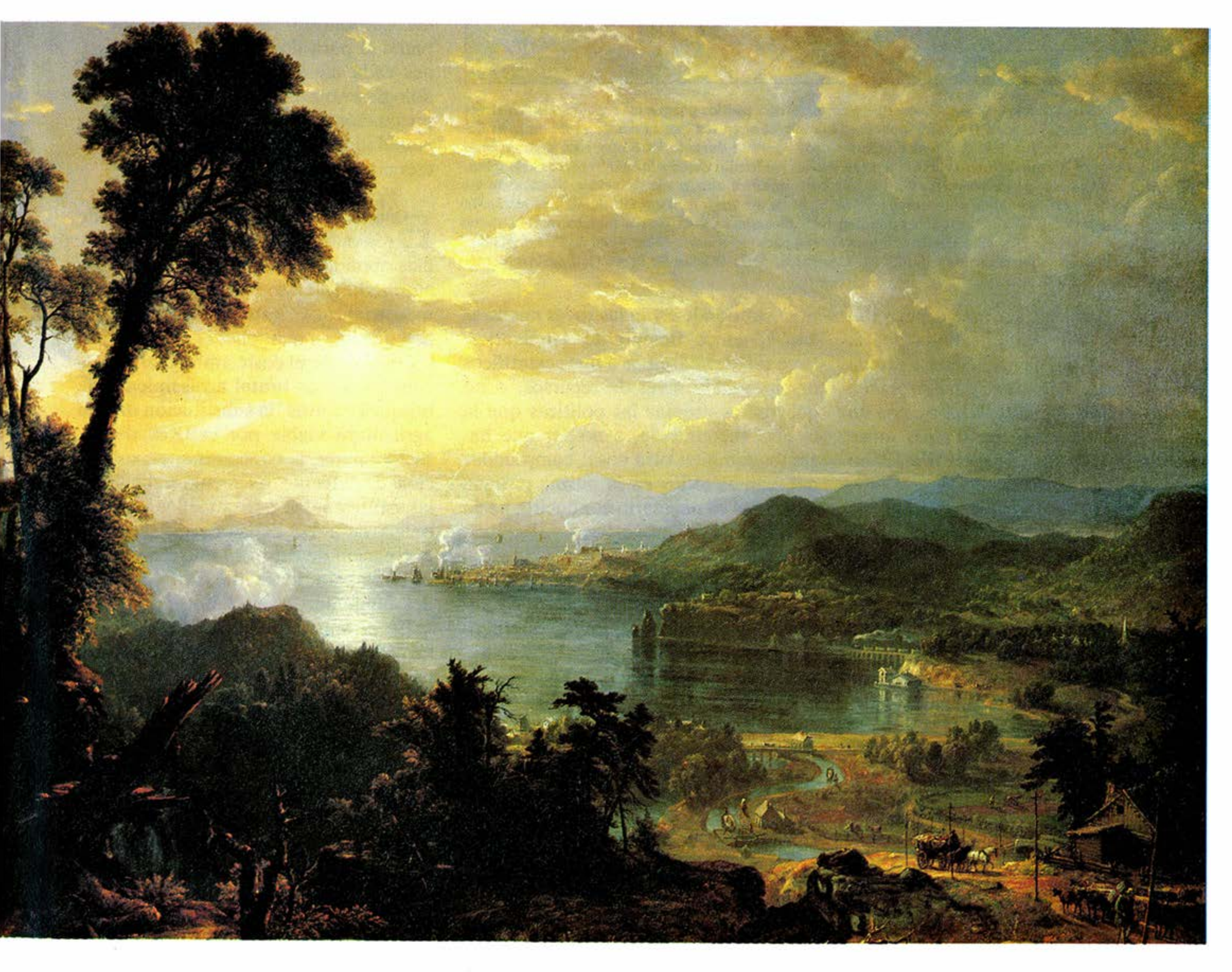
Podemos confiar en que, si surgen crisis o problemas, no dejará de haber alguna solución o serie de soluciones técnicas, y en que el funcionamiento normal del mercado se las arreglará, por sí solo, para solventar el problema mediante una sustitución del producto de que se trate.

Se están introduciendo o comercializando ya, por ejemplo, nuevos refrigerantes que no tienen los efectos atmosféricos de los clorofluorcarburos; tal vez se llegue a descubrir una fuente de energía barata y no contaminante.

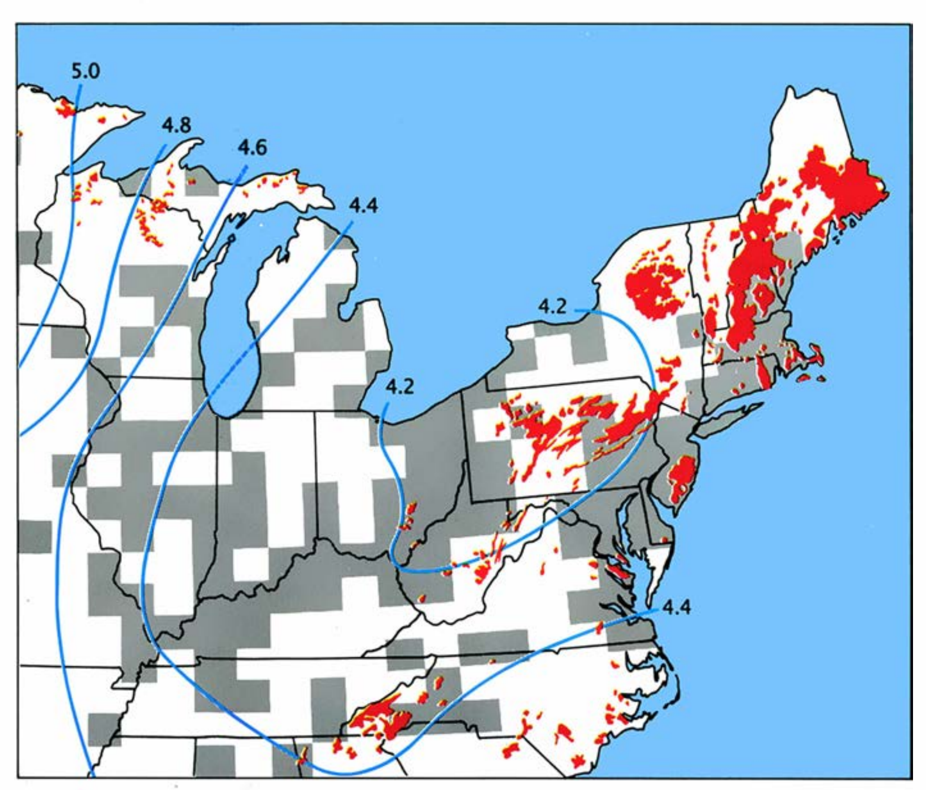
Desde luego, es alentador imaginar que podríamos conseguir un mañana más seguro con poco esfuerzo, suponer con Mr. Micawber, de Dickens, que acontecerá algo positivo. Imaginarlo no es dañino, pero sí lo es confiar en ello. Hemos de hacer frente a la posibilidad real de que en el mundo esté sucediendo algo grave. Nuestra especie puede estar llevando hasta un límite sin retorno el consumo de combustibles fósiles y los atentados contra los ecosistemas. Debemos considerar, al menos, la posibilidad de que, además de efectuar modestos ajustes prudenciales, acaso tengamos que prepararnos para unos cambios mucho más drásticos, unos cambios que empiecen a ir dando forma a una sociedad y una economía mundial viables.

La naciente doctrina de la viabilidad dice que el crecimiento y el desarrollo económicos deben tener lugar y mantenerse a lo largo del tiempo dentro de los límites impuestos por la ecología en su sentido más amplio, a saber, por las interconexiones de los seres humanos y sus obras con la biosfera y con las leyes físicas y químicas que la rigen. La doctrina de la viabilidad afirma también que la extensión de un razonable nivel de prosperidad y seguridad a las naciones menos desarrolladas es esencial para proteger el equilibrio ecológico y, por ende, para que las naciones ricas puedan seguir disfrutando de prosperidad. De donde se sigue que la protección del entorno y el desarrollo de la economía son procesos complementarios, no antagónicos.

¿Podemos mover a las naciones y a la gente en la dirección que conduce hacia la viabilidad? Un movimiento así sería una modificación de la sociedad únicamente comparable en escala con otros dos cambios: la revolución agrícola de finales del Neolítico y la revolución industrial de los dos últimos siglos. Aquellas revoluciones fueron graduales, espontáneas y en gran parte inconscientes. En cambio, ésta de



1853. Según la historiadora del arte Barbara Novak, en esta imagen "parece haberse logrado una equilibrada conciliación de la naturaleza y la cultura". La decimonónica visión que de la industrialización tuviera Durand podría servir de metáfora para representar la actual concepción de un desarrollo económico viable. El cuadro se encuentra depositado en la Colección Warner de la Corporación Papelera de los Estados del Golfo, en Tuscaloosa, Alabama.



2. LLUVIA ACIDA. Esa precipitación constituye un problema político porque las emisiones industriales causantes de la misma cruzan fronteras políticas. Las regiones en las que la densidad de emisión del dióxido de sulfuro pasó de 1,5 toneladas por kilómetro cuadrado durante 1980 aparecen aquí en tono gris; los estados en los que hubo mayores emisiones son los del Medio Oeste y los que recorre el río Ohio. Los trazos indican los *p*H de precipitación; un *p*H bajo significa alto grado de acidez. Dentro de las regiones con bajo *p*H, los lagos y las corrientes de agua tienen mayor riesgo allí donde sea menor la alcalinidad del agua (*tono naranja*), sobre todo en los Adirondacks y en Nueva Inglaterra. Los datos sobre el dióxido sulfúrico proceden del Programa Nacional para la Tasación de las Precipitaciones Acidas; los de la alcalinidad se los debemos a James M. Omernick, de la Oficina de Protección del Ambiente.

ahora tendrá que ser una operación plenamente consciente, guiada por la mejor previsión que la ciencia pueda proporcionar, una previsión extremada al límite. Si realmente la ponemos en obra, será una empresa sin par entre cuantas la humanidad ha llevado a cabo sobre la Tierra.

La forma de tamaña empresa no puede apreciarse con claridad desde nuestra ubicación actual. La imagen al uso nos habla de un cruce de caminos: el forzoso elegir una dirección u otra determina el futuro para un considerable período. Pero eso no abarca la entera complejidad de nuestra actual situación. Una imagen más apropiada sería la del piragüista que va sorteando los rápidos: la supervivencia depende de que se acierte a responder de continuo a la información con una conducción adecuada. En nuestro caso, la información la proporcionan la ciencia y los acontecimientos económicos; la conducción es cosa que compete a la política gubernamental y al comportamiento privado.

Hacerse con el control del futuro significa, por consiguiente, estrechar los lazos entre la ciencia y la política. Nos urge ver dónde están las rocas mientras aún tenemos tiempo de esquivarlas. Pero no destinaremos a fines científicos un apropiado nivel de recursos, o no querremos aceptar las políticas que la ciencia recomiende, a no ser que hagamos también otra cosa: comprender que vamos todos en la misma piragua y que nos es necesario conducirla hacia la viabilidad.

Viabilidad que fue la economía originaria de nuestra especie. La humanidad preindustrial vivía congruentemente porque no podía menos de hacerlo; de lo contrario, si expandía sus poblaciones más allá de la base de recursos disponibles, esas poblaciones sucumbían antes o después por el hambre, o se veían forzadas a emigrar. Lo que aseguraba la viabilidad de su manera de vivir era una singular conciencia respecto a la naturaleza: aquellas gentes estaban espiritualmente conectadas con los animales y las plantas que les garantizaban la subsistencia; eran, por decirlo así, parte integrante del paisaje, de la naturaleza, no unos seres aparte de ella y que la dominasen.

Los tiempos de aquella "viabilidad originaria" se acabaron hace ya mucho. El desarrollo de las ciudades y las necesidades del mantenimiento de las poblaciones urbanas exigieron una agricultura intensiva que produjera excedentes. A medida que una población aumenta, hace falta ir incrementando la producción, ya mediante conquistas o colonizaciones, ya mejorando la técnica.

Esta forma de vivir se basa en una conciencia diferente, que se concreta también en una estructuración cultural. Se considera a la tierra y sus criaturas como propiedad de la humanidad, como el regalo que a ésta le hiciera un Ser sobrenatural. El hombre está, así, por encima de la naturaleza, la cual queda relegada a mero escenario, que él domina, controla y manipula a su arbitrio. Más adelante, con la industrialización, el hombre llegará a colonizar, incluso, el pasado: los grandes bosques del Carbonífero se explotan en la actualidad para dar sustento a poblaciones cada día más numerosas. La tecnología avanzada da impulso a la básica presunción de que los poderes de la humanidad sobre la naturaleza son, en esencia, ilimitados.

Esta conciencia, esta condición de "inviabilidad pasajera", es, hoy día, dominante. Tiene dos formas. En el mundo subdesarrollado y en vías de industrializarse, está representada por la tendencia a mantener el crecimiento, sea cual fuese el coste ambiental. Lleva consigo el más brutal arrasamiento de bosques y selvas, la substitución de una agricultura viable por cultivos de cosecha rápida, la concomitante explotación de terrenos muy vulnerables por las gentes a las que aquellos cultivos obligaron a irse de las tierras fértiles y la creación de centros industriales, que son también focos de contaminación del ambiente.

En el mundo industrializado, el desarrollo inviable ha generado riqueza y un bienestar relativo para cerca de una quinta parte de la humanidad, y entre las poblaciones de las naciones industrializadas es casi universal la conciencia que da respaldo a la economía inviable. Con pocas excepciones importantes, el movimiento de protección al ambiente en esas naciones, a pesar de sus notables éxitos en hacer aprobar leyes y diversas medidas para el control de la contaminación, no ha influido gran cosa en las costumbres de la mayoría. El ecologismo ha sido, hasta la fecha, un factor de correcciones y mejoras, pero no una fuerza reestructu-

rante. No pasa de un ir incluido en la conciencia de inviabilidad.

Aunque no podemos volver a la economía congruente de nuestros remotos antepasados, tampoco hay razón, en principio, por la que no podamos crear una conciencia de viabilidad adecuada a la época moderna. Tal conciencia entrañaría las siguientes convicciones:

1. *La especie humana es parte de la naturaleza. La existencia de la humanidad depende de que sepa obtener su sustento a partir de un mundo natural finito; su continuidad depende de su capacidad para abstenerse de destruir los sistemas naturales que regeneran este mundo.* No otra parece ser la principal lección que se saca de observar la actual situación del entorno y que viene a ser, también, un corolario directo de la segunda ley de la termodinámica.

2. *La actividad económica deberá tener en cuenta los costes ambientales de la producción.* La regulación sobre el entorno ha arrancado de este punto, aunque con poco empuje aún. El mercado no ha comenzado todavía a movilizarse para preservar el ambiente; como consecuencia de ello, una porción cada vez mayor de la "riqueza" que creamos se la estamos, en cierto modo, robando a nuestros descendientes.

3. *El mantenimiento de un entorno global vivible depende del desarrollo sostenible de toda la familia humana.* Si el 80 por ciento de los miembros de nuestra especie son pobres, no podemos tener esperanzas de vivir en un mundo en paz; si las naciones pobres intentan mejorar su suerte por los métodos que nosotros, los ricos, hemos utilizado y promovido antes, el resultado habrá de ser ecológicamente funesto para el mundo entero.

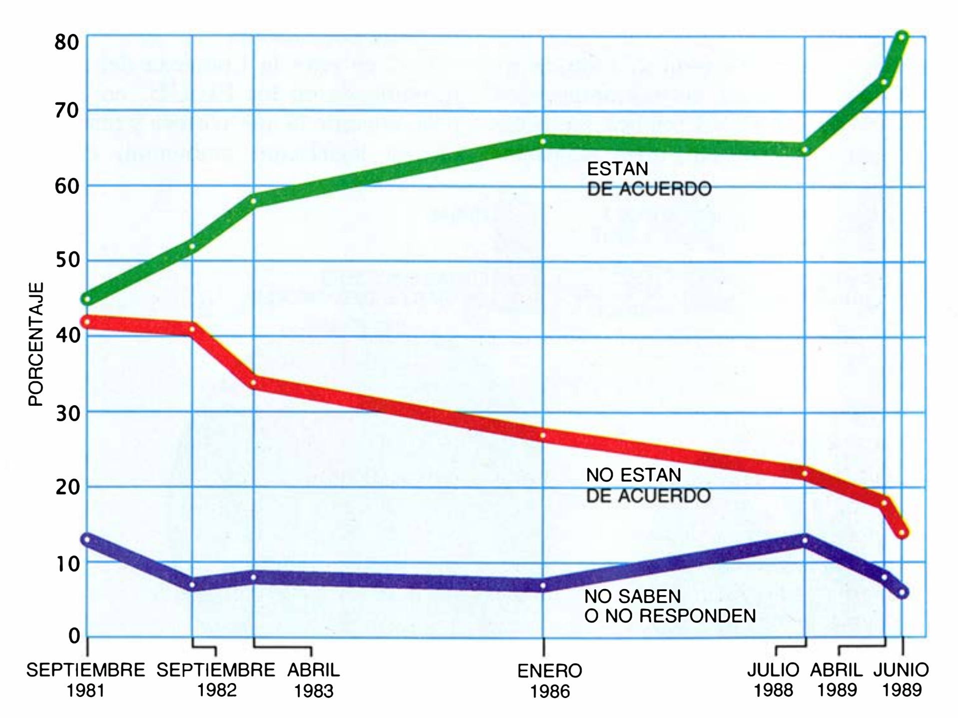
A esta concienciación no se llegará simplemente porque los argumentos en favor del cambio sean buenos o porque las alternativas sean ingratas. Ni bastará tampoco con exhortaciones. La lección que mejor saben los que llevan a cabo políticas realistas es la de que la mayoría de los individuos y de las organizaciones cambian sólo cuando les interesa cambiar, ya porque el cambio les reporte algún beneficio, ya porque teman ser sancionados si no cambian; cuanto menos tiempo medie entre ese cambio (o la falta de él) y el consiguiente beneficio (o la consiguiente sanción) tanto mejor. Esto no es mero cinismo. Aunque la gente aguante largos períodos de lucha y de sufrimientos para alcanzar una meta, no es razonable esperar que los individuos o las organizaciones actúen durante mucho tiempo en contra de sus intereses inmediatos; sobre todo en un sistema democrático, donde lo que la gente estima que son sus intereses tiene tanta importancia para la orientación del gobierno.

Para que los intereses cambien, se requieren tres cosas. Primera, que los dirigentes articulen en el sector público y en el privado un claro conjunto de valores acordes con la conciencia de la viabilidad. Segunda, que se afiancen las motivaciones necesarias para apoyar esos valores. Tercera, en fin, que sean creadas unas instituciones para aplicar las motivaciones de un modo eficaz. La primera de estas cosas es relativamente fácil, la segunda es más difícil y la tercera es tal vez la más difícil de todas.

En efecto, valores similares a los arriba descritos han sido ya convenientemente articulados por dirigentes políticos de muchas naciones del mundo. El año pasado, el presidente y el secretario de estado de los EE.UU., el líder de la Unión Soviética, la primera ministra de Gran Bretaña y los presidentes de Francia y del Brasil hicieron importantes declaraciones relativas al ambiente. En el mes de julio, los dirigentes del Grupo de los Siete principales países industrializados pidieron "la pronta adopción, por todo el mundo, de medidas basadas en un desarrollo viable". La mayoría de las naciones industrializadas cuentan con una estructura legal para regir los asuntos que atañen al medio ambiente nacional en la que, al menos hasta cierto punto, se reflejan tales valores, y se celebran conferencias internacionales en las que también empiezan a manifestarse.

La mera aceptación de un cambio de la tabla de valores, aun siendo un prerequisito, no genera, de por sí, el imprescindible cambio de conciencia, ni hace que cambie el medio ambiente. Por mucho que los diplomáticos y los legisladores discutan sobre palabras y aspectos formales, hablar no es actuar. En los EE.UU., que tienen una reglamentación ambiental más rigurosa que ninguna otra, y donde, elección tras elección, se han podido oír durante los últimos 15 años toda clase de promesas y buenos deseos de aumentar la protección al medio ambiente, la mayoría de la población participa en el estilo de vida más derrochador y más contaminante de cuantos hay en el mundo industrializado. Los valores están ahí; las motivaciones apropiadas y las instituciones que las pongan en juego o son patentemente inadecuadas o ni siquiera existen.

Las dificultades del pasar de los va-



3. VALORES AMBIENTALES y calado de los mismos en la conciencia ciudadana. En repetidos sondeos realizados por el *New York Times* y la cadena CBS desde 1981, se les pedía a los encuestados que opinasen sobre esta afirmación: "Proteger el ambiente es cosa tan importante que las exigencias y las normas al respecto nunca serán excesivas y hay que seguir haciendo mejoras ambientales, cuesten lo que cuesten". Los datos de los dos últimos sondeos fueron obtenidos tras la catástrofe del petrolero *Exxon Valdez*.

lores reconocidos a las motivaciones y a las instituciones que les den realidad se derivan de ciertas características básicas de las principales nacionales industrializadas, que son precisamente las que, por su poder económico y por ser, a la vez, las que más contaminan y las que mayor parte se llevan de los recursos mundiales, deben ir a la cabeza en cualquier proceso de cambio del actual orden. Pues bien, estas naciones son democracias y su sistema económico es el de libre mercado. Y lo irónico del caso es que las dificultades de que estamos hablando nacen, por una parte, del sistema económico de libre mercado y, por otra, de la democracia.

El problema económico es uno muy consabido, el de las externalizaciones: el coste ambiental de la producción de un bien o de un servicio no se cuenta en el precio que se paga por él. Como lo ha expresado el economista Kenneth E. Boulding: "Todos los sistemas naturales son curvas cerradas, mientras que las actividades económicas son lineales y suponen inagotables recursos y 'pozos negros' en los que arrojar nuestra basura". Obstinándose en la ignorancia y violando el principio esencial del capitalismo, nos negamos frecuentemente a tratar como capital los recursos ambientales. Les gastamos como una renta y, cuando nuestros cheques empiezan a ser rechazados, nos quedamos tan confusos como cualquier estúpido heredero despilfarrador.

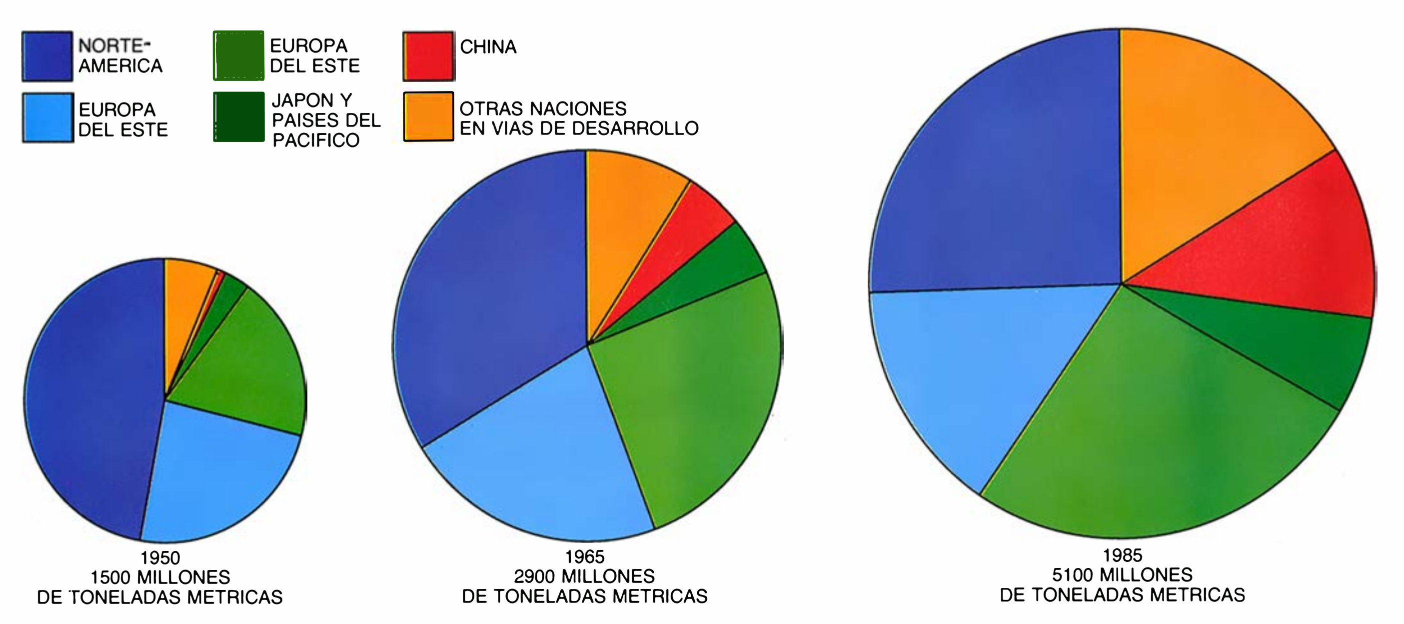
Riquezas tan "comunes" como la atmósfera, los mares, las pesquerías y los bienes de propiedad pública están especialmente expuestas a ser malgastadas de esta forma, a que se las trate como recursos inagotables o como sumideros sin fondo. La razón de ello es que el beneficio adicional por cada usuario se acumula exclusivamente para ese usuario, y a corto plazo es una ganancia; la degradación del medio ambiente recae, por contra, sobre todos los usuarios y sólo se evidencia a largo plazo, cuando el recurso explotado da ya señales de agotamiento o de extinción total. Hace algunos años, el biólogo Garrett Hardin llamó a esto la tragedia de las riquezas comunes.

El modo de evitar esa tragedia de los bienes comunes –de hacer que la gente pague la totalidad de lo que cuesta la utilización de un recurso natural– no es otro que cerrar las curvas en los sistemas económicos. El que generalmente no se haga esto en el mundo industrializado guarda relación con el segundo problema: el de la acción en una democracia. Modificar el mercado para que se reflejen en él los costes ambientales es necesariamente una función del gobierno. Las personas y entidades que están en contra de tales modificaciones, aunque quizá no constituyan sino una pequeña minoría de la población, tienen a menudo desproporcionada influencia en la gestión de la cosa pública. Por lo general, la minoría muy perjudicada demuestra mucha más eficacia para salirse con la suya mediante manejos y presiones que la mayoría ligeramente beneficiada.

La Ley para la Limpieza del Aire, promulgada en los EE.UU. en 1970, posiblemente la más costosa y más ambiciosa legislación ambiental, es un buen ejemplo. Algunas de sus partes fueron concebidas, no tanto para limpiar el aire, cuanto para proteger el empleo de los mineros del carbón en las regiones donde éste contenía mucho azufre. A las empresas públicas y a otros grandes consumidores no se les permitía sustituir ese carbón por otro que tuviera menos azufre, pero se les obligaba, en cambio, a instalar dispositivos depuradores.

Aunque la referida ley quedó abolida hace siete años, el Congreso encontró durísima resistencia para plantear una revisión, en gran parte por otra serie de intereses contrarios, relacionados con la lluvia ácida. El generalizado interés nacional por reducir los daños ambientales atribuibles a esta contaminación a gran escala tuvo que vencer la oposición de los intereses de la minería del carbón rico en azufre y la de los industriales del Medio Oeste, que habrían de hacer mayores dispendios si se les obligaba a controlar las emisiones sulfúricas de sus fábricas. El problema de los conflictos de intereses se agrava con la distancia que hay entre las mayores fuentes de lluvia ácida y las regiones más afectadas por este perjuicio. Se acentúa cuando la contaminación cruza límites estatales y fronteras nacionales: los representantes electos están menos dispuestos a consentir efectos nocivos a corto plazo para sus electores cuando los beneficiarios inmediatos no son gentes que puedan darles a ellos voto alguno.

La cuestión está, por tanto, en si las democracias industriales serán capaces de superar las coacciones políticas a la hora de encaminar el sistema econó-



4. NACIONES DESARROLLADAS responsables de muchas más emisiones industriales del principal gas de invernadero, el dióxido de carbono, que las que tienen lugar en las naciones en desarrollo. El total de las emisiones ha aumentado mucho desde 1950. Datos del Instituto de Recursos Mundiales.

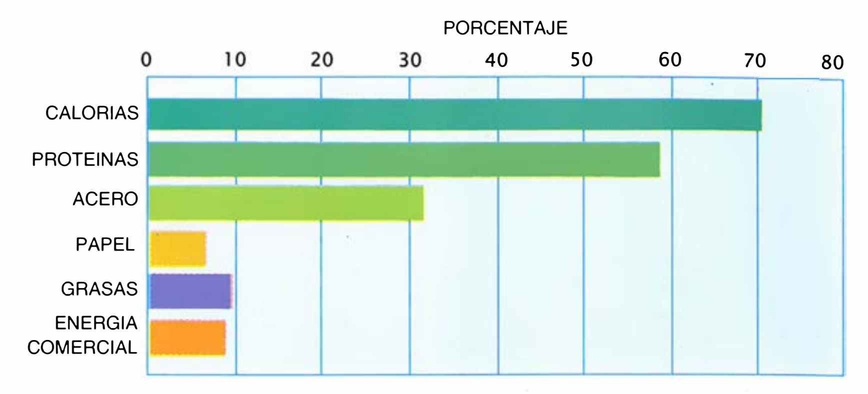
mico de mercado hacia la viabilidad a largo plazo. La historia nos permite ser algo optimistas: cierto número de contingencias han inducido a las naciones a aceptar cargas a corto plazo para alcanzar con el tiempo una meta.

Un ejemplo obvio es el de la guerra. Cosas que, política o económicamente, se consideraban imposibles pueden realizarse en un tiempo brevísimo si se cree que del hacerlas depende la supervivencia de la nación. La segunda guerra mundial movilizó a la población de los EE.UU., cambió la manera de trabajar, alteró y puso bajo control los precios y los suministros de todo tipo de artículos y reorganizó de arriba abajo la maquinaria industrial del país entero.

Otro ejemplo es el Plan Marshall para la reconstrucción de Europa después de la segunda guerra mundial. En 1947, los EE.UU. gastaron alrededor del 3 por ciento de su producto nacional bruto en este gran conjunto de proyectos. Aunque lo que impulsó mayormente el plan fue el miedo a que la influencia soviética se expandiese por Europa occidental, lo cierto es que aquella iniciativa sentó el precedente de destinar unas inversiones colosales al aumento de la prosperidad de naciones extranjeras.

Hay más ejemplos. El feudalismo tuvo su fin en el Japón, como la esclavitud en los EE.UU., en el siglo XIX; nuestro siglo ha presenciado la retirada del imperialismo y la creación de la Comunidad Económica Europea. En cada uno de estos casos, importantes intereses hubieron de dejar vía libre a las nuevas aspiraciones nacionales.

Si es posible cambiar, ¿cómo empezaremos a motivar el cambio? Ni que decir tiene que la política gubernamental debe indicar el camino, puesto que los precios de mercado de los artículos de consumo no suelen reflejar los costes ambientales de su extracción y sustitución, como tampoco los precios de la energía obtenida a partir de combustibles fósiles reflejan los riesgos de cambio climático. La política de precios es el medio más directo de asegurarse de que se contabilice íntegramente el coste ambiental de todos los bienes y servicios. Cuando el gobierno es el propietario de un recurso o lo suministra directamente, puede hacer que el precio que se carga refleje el auténtico coste del producto. El mercado se adaptará a esto, como se adapta a la verdadera escasez: mediante la sustitución y la conservación del producto.



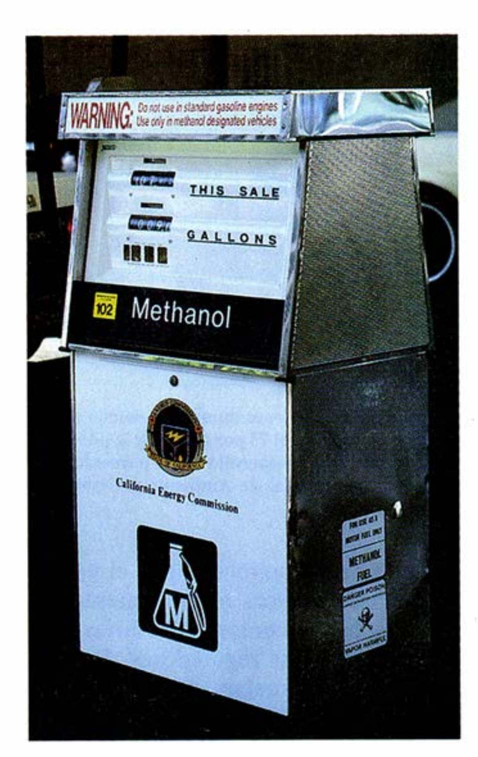
5. LAS NACIONES DESARROLLADAS consumen una porción de los bienes mundiales mucho mayor que la que gastan los países subdesarrollados, los cuales tienen, en cambio, el 75 por ciento de la población mundial. Muéstrase aquí el consumo per cápita en los países en vías de desarrollo como porcentaje del que se da en los desarrollados. Datos calculados por la Comisión Mundial de Ambiente y Desarrollo.

La regulación del medio ambiente debería replantearse con miras a movilizar, más que a suprimir, la libre iniciativa y la creatividad de la industria. Por ejemplo, habría que conseguir para el control de la contaminación unas ganancias adicionales, no simplemente extremando el rigor o el especialismo técnico en la regulación de los controles y las disposiciones, sino también mediante sistemas incentivadores complementarios. Tales sistemas aumentan en decenas de miles de decisiones individuales y corporativas las tomadas por el sector público. Desde luego, los sistemas de incentivación no constituyen ninguna panacea. Para algunos problemas del medio ambiente, pensemos en los planteados por el uso de sustancias químicas excesivamente peligrosas, serán siempre necesarias unas tajantes medidas reguladoras. Las políticas eficaces suelen incluir una mezcla de incentivos estimuladores y de firmeza reguladora en sus enfoques y directrices.

Pero los planteamientos que se basen en el mercado habrán de formar parte de todo intento de reducir el efecto de invernadero. En este momento, las opciones más atractivas incluyen el fomentar el rendimiento energético. Aumentando su aprovechamiento se logra el ideal de doble beneficio de un seguro: tal aumento es ya, en sí, un



6. DISTINTA APRECIACION DE LOS PROBLEMAS DEL AMBIENTE según se trate de habitantes y gobiernos de las naciones ricas o de los análogos de las naciones pobres. Para su relación, sin embargo, será necesario el concurso de ambos. Dibujo de Scott Willis, colaborador del *San Jose Mercury News*.



7. SUSTITUCION: un método eficaz de reducir la contaminación. Remplazando la gasolina por el metanol como combustible se reducirían las emisiones de dióxido de carbono y de hidrocarburos.

bien y, además, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono, contrarresta el proceso del calentamiento global. Si el mundo mejorase el rendimiento de la energía en un 2 por ciento al año, se conseguiría que el promedio de la temperatura global no subiera de los niveles actuales más de un grado centígrado. Muchas naciones industrializadas han mantenido un porcentaje de aumento próximo a éste durante los 15 últimos años.

Promover la eficacia de la energía es también relativamente fácil. Los EE.UU. redujeron la intensidad energética precisa para su producto nacional en un 23 por ciento entre 1973 y 1985, sin notarlo mucho. Un importante aumento de ese rendimiento se puede conseguir, inclusive, con la técnica existente. Algo tan simple como elevar la calidad de todos los edificios estadounidenses que se construyan en adelante, ateniéndose para ello a los mejores criterios y patrones mundiales, representaría un ahorro de enormes cantidades de energía. Hoy por hoy, es más la energía que entra y sale, perdiéndose, por las ventanas de los edificios de nuestro país que la que fluye por el oleoducto de Alaska.

Cabe, no obstante, la posibilidad de que haya que promover un mejor aprovechamiento mediante especiales incentivos del mercado, porque los precios de la energía tienden a quedar por detrás de los incrementos de la renta. Un impuesto de "protección del clima" de 1 dólar por cada millón de Btu ["British thermal units", es decir, unidades térmicas británicas] sobre los carbones y de 60 centavos por millón de Btu sobre el fueloil es un ejemplo de tal tipo de incentivos. Ese impuesto elevaría los precios de la gasolina en 11 centavos por galón y el coste de la electricidad en un promedio del 10 por ciento, y con ello se obtendrían 53.000 millones de dólares al año.

La regulación directa mediante el establecimiento de normas resulta fastidiosa, pero puede hacerse necesaria cuando no son eficaces las señales implícitas de mercado. Ejemplos de esto son las normas del kilometraje, impuestas en los EE.UU. para los automóviles, y los patrones de eficacia de los electrodomésticos, que se adoptaron en 1986. La normativa referente a los electrodomésticos habrá ahorrado 28.000 millones de dólares en costes energéticos para el año 2000 y habrá impedido que vayan a ensuciar la atmósfera 342 millones de toneladas de carbono.

A largo plazo, es probable que sea necesario algún programa de comercio sobre vertidos y emisiones contaminadoras a una escala mucho mayor que la abarcada hasta el presente. (Por cierto que, en la propuesta presidencial de una nueva Ley para la Limpieza del Aire, se incluye la consolidación de un sistema de permisos negociables.) En un programa así, los principales emisores de elementos contaminantes precisarán permisos en los que se especifique el nivel de emisión o vertido admisible. Las empresas que decidiesen reducir sus emisiones y mantenerlas a un nivel inferior al permitido –por ejemplo, mejorando el rendimiento– podrían vender a otras firmas sus excedentes de "derecho a contaminar". Y aquellas que estimasen prohibitivamente caro poner al día sus viejas fábricas o construir otras nuevas, podrán comprar esos derechos o cerrar sus derrochadoras plantas industriales y vender los derechos que ya no necesitaran.

Otro tipo de comercio de emisiones rebajaría tal vez el impacto de la liberación de dióxido de carbono. A las compañías responsables de nuevas emisiones de este gas de invernadero podría exigírseles que las compensaran aumentando en general el rendimiento energético, cerrando fábricas o haciendo repoblaciones forestales y trabajos de conservación de bosques que fuesen reabsorbiendo aquellas emisiones. Una vez establecido el sistema, el progreso hacia la ulterior reducción de las emisiones se lograría rebajando los niveles de la cantidad total permitida de los distintos contaminantes, tanto a escala nacional, como permiso por permiso.

Los tipos de programas que acabo de describir deberán contar con el respaldo de una investigación científica que proporcione una sólida base a las nuevas estrategias de protección del ambiente. La búsqueda de fuentes de energía seguras y no contaminantes y de técnicas que ahorren energía tiene todos los visos de llegar a ser especialmente fructífera. Un ejemplo: a mediados de la década de los setenta, el Departamento de Energía de los Estados Unidos desarrolló varias técnicas de aprovechamiento energético por un coste de 16 millones de dólares; entre ellas, un diseño de lámparas con tubos fluorescentes que sustituyen a las bombillas ordinarias y unos revestimientos para las ventanas que ahorran energía tanto en las temporadas de calor como en las de frío. A los ritmos de realización actuales, esas nuevas técnicas generarían unos 63.000 millones de dólares en ahorros de energía para el año 2010.

La motivación para el cambio hacia la viabilidad tendrá que apuntar a mucho más que a reducir la contaminación y el derroche de los recursos en los países en vías de desarrollo, y no puede dejarse enteramente en manos de los organismos encargados de velar por el ambiente en esos países. Las organizaciones cuyos objetivos son el desarrollo económico, la explotación de los recursos y el comercio internacional –junto con la política exterior en general– deberán proponerse también como meta central un desarrollo viable. Es éste un formidable desafío, pues da en el punto álgido de muchos intereses particulares. Harán falta buenas dosis de habilidad política para conseguir que se otorgue a la protección del ambiente la preeminencia pública que sólo los asuntos económicos y la seguridad nacional (en el sentido militar) han acaparado.

Pero donde las naciones industrializadas habrán de enfrentarse a los mayores retos es en sus relaciones con el mundo subdesarrollado. La ayuda es a la vez una respuesta y un problema perpetuo. El total de la ayuda oficial para el desarrollo prestada por el mundo desarrollado al retrasado viene a su-



8. ARMA HUMEANTE. Un ciudadano de Nizhniy Tagil, centro industrial próximo a Sverdlovsh, de pie sobre nieve cubierta de hollín, contempla las chimeneas de los altos hornos. En la primavera de 1988, una bruma química densa provocó el rechazo de los lugareños, quienes lograron la clausura de uno de los dos hornos. Las chimeneas, símbolo de la actividad económica, constituyen también la prueba de la agresión contra el ecosistema.

mar unos 35.000 millones de dólares al año. No es mucho dinero, si se considera que solamente los EE.UU. habrían de destinar a la ayuda exterior 127.000 millones de dólares cada año para gastar en tal ayuda la misma proporción de su producto nacional bruto que consumieron durante los años punta del Plan Marshall.

Es claro que no cabe pensar en una adecuada ayuda a los países subdesarrollados mientras no se resuelva la cuestión de su deuda. Según un informe del Banco Mundial, en 1988, los 17 países más endeudados pagaron a las naciones industrializadas y a las organizaciones multinacionales 31.000 millones de dólares más que los que recibieron a título de ayuda. Las cosas no pueden seguir así. Entre prestamistas tan importantes como el Citicorp y algunos países de Sudamérica se viene efectuando una remodelación de la deuda a base de canjes: el banco condona los empréstitos a cambio de que se le cedan extensiones de tierra, para convertirlas en zonas de conservación o de parques naturales. Esto es admirable, pero, por sí solo, no resuelve el problema. Las relaciones básicas del comercio internacional han de replantearse con miras a eliminar, entre otras cosas, los perniciosos efectos que causan sobre el mundo subdesarrollado las subvenciones agrarias y las tarifas aduaneras del mundo industrializado.

Una sociedad rural próspera, basada en una agricultura viable, deberá preludiar el futuro desarrollo en gran parte del mundo rezagado, y los gobiernos tendrán que cuidarse de motivar a la gente a vivir de una manera ecológicamente responsable. Los campesinos no suelen cosechar más cuando los gobiernos subsidian a las poblaciones urbanas manteniendo bajos los precios de los productos del campo. Tampoco dejará la gente de tener prole numerosa si el trabajo de los hijos es el único apoyo económico con que cuentan. Los labradores no se preocupan de mejorar los campos que no son de su propiedad; está claro que habrá que instituir reformas en cuanto a la posesión del agro.

Las sanciones con que se castigan los abusos contra el medio ambiente se encuentran a faltar en la mayor parte del mundo subdesarrollado; contribuiría probablemente a remediar esta situación el que cantidades importantes de la ayuda externa se destinasen directamente a mejorar las condiciones y aumentar las disponibilidades de los ministerios del medio ambiente de los países en vías de desarrollo. Ministerios que hoy suelen andar faltos de asignación y, por tanto, son ineficaces; en particular si se los compara con las carteras militares o de desarrollo económico. Para poner un pequeño ejemplo: en Tanzania los guardas de las reservas de caza perciben un salario anual equivalente al precio que se les paga a los cazadores furtivos por dos colmillos de elefante; razón por la cual esa nación ha perdido durante la pasada década dos tercios de su población de elefantes en beneficio del tráfico de marfil.

Para articular los valores y crear las motivaciones que favorezcan la implantación de una economía mundial viable, será necesario cambiar las instituciones existentes y habrá que establecer otras nuevas. Estas tareas serán dificultosas, porque las instituciones tienen fuerza en tanto en cuanto representan y respaldan a poderosos intereses, lo que de ordinario implica el mantenimiento del *statu quo*.

Las instituciones internacionales que más pesan en el mundo de hoy son las relacionadas con los asuntos del dinero, el comercio y la defensa nacional. Quienes desesperan de que las cuestiones relativas al ambiente lleguen a alcanzar nunca un nivel de importancia comparable, deberían recordar que algunas de las instituciones actuales (por ejemplo, la OTAN, el Banco Mundial, corporaciones multinacionales) tienen una historia muy corta. Se formaron en virtud de intereses y presiones para adquirir y expandir la riqueza y para mantener segura la soberanía nacional. Si el interés por el entorno llega a presionar con una intensidad comparable, se desarrollarán, a ese respecto, instituciones de parecida o mayor importancia.

Para llevar adelante tamaña empresa, se necesitan tres cosas. La primera es dinero. El presupuesto anual de las Naciones Unidas para el medio ambiente [programa PANU] es de 30 millones de dólares, cantidad irrisoria, habida cuenta de sus responsabilidades. Si las naciones abordan seriamente la cuestión de la viabilidad, dotarán a sus organismos de dirección ecológica con caudales más cuantiosos, preferiblemente derivados de alguna fuente dineraria independiente, al objeto de reducir su vulnerabilidad política. Como medio de lograr este fin, se ha sugerido un impuesto sobre determinados usos de los recursos comunales del mundo.

La segunda cosa que se necesita es información. Se ha de contar con buenas organizaciones internacionales que se dediquen a recoger y analizar datos y a redactar informes acerca de las tendencias y los peligros del ambiente. El programa de Vigilancia de la Tierra, puesto en funcionamiento por el PANU, es ya un comienzo, pero hace falta que haya una fuente autorizada de información y asesoría científicas que sea independiente de los gobiernos nacionales. Existen muchos organismos no oficiales o paraoficiales capaces de desempeñar esa función; es preciso conjuntarlos en una red de cooperación. Necesitamos una institución universal que pueda dar respuesta a preguntas de alcance universal.

La tercera cosa necesaria es integrar los esfuerzos. El mundo no puede permitirse una multiplicación de esfuerzos aislados para resolver problemas comunes. Sobre todo en el aspecto de las ayudas, esos particularismos resultan trágicamente absurdos: sólo Africa es atendida en la actualidad por 82 donantes internacionales y por más de 1700 organizaciones privadas. En 1980, en la pequeña nación africana de Burkina Faso (cuya población es de unos 8 millones), había en curso 340 planes de ayuda independientes unos de otros. Hay que establecer y reforzar instituciones coordinadoras, que combinen los distintos esfuerzos de organizaciones privadas, organismos internacionales y grupos empresariales, para que todos se concentren en tratar de resolver problemas específicos.

Finalmente, al ir creando la conciencia de una progresiva viabilidad, tendremos que redefinir nuestros conceptos de viabilidad política y económica. Estos conceptos no pasan de ser, en resumidas cuentas, simples constructos humanos; en el pasado fueron diferentes y lo más seguro es que cambiarán también en el porvenir. Pero la tierra es real, y el hecho de que dependemos totalmente de ella nos obliga a escuchar sus mensajes con mayor atención de lo que solemos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE GLOBAL POSSIBLE: RESOURCES, DEVELOPMENT, AND THE NEW CENTURY. Dirigido por Robert Repetto. Yale University Press, 1985.

ARE TODAY'S INSTITUTIONAL TOOLS UP TO THE TASK? Michael Gruber en *EPA Journal*, vol. 14, n.º 7, págs. 2-6; noviembre/diciembre de 1988.

STATE OF THE WORLD 1989. Lester R. Brown et al. W. W. Norton & Company, febrero de 1989.

Taller y laboratorio

Una gota de lluvia es la puerta de entrada a la óptica de catástrofes

Jearl Walker

Todos los que usamos gafas sabemos de la impertinencia de esas gotas de lluvia que aterrizan en los cristales y nos enturbian la vista. Pero no hay mal que por bien no venga. Cualquier gota de ésas permite atisbar la existencia de un mundo parcialmente oculto, donde la luz crea complejas estructuras que rivalizan con la crestería de muchas catedrales. Si observamos de noche, a través de una gota, una farola un poco alejada, se nos presentarán ante la vista parte de esas estructuras. (Si el lector no usa antiparras, puede emplear un vidrio de ventana y acercar el ojo a la gota.)

Tan intrincadas figuras se componen de líneas brillantes a lo largo de las cuales la gota enfoca la luz que nuestro ojo intercepta. La imagen resultante recibe el nombre de cáustica, término éste derivado del hecho de acuerdo con el cual, con una lente, se puede practicar por combustión un agujero en un papel concentrando la luz solar. En los últimos años estas figuras se han estudiado dentro de la teoría de catástrofes, por lo que actualmente ya constituyen ejemplos típicos de la óptica de catástrofes.

Las líneas brillantes suelen ser cóncavas hacia afuera y convergen formando cúspides [*véase la figura 3*]. A veces, la zona interior de la figura aparece parcialmente ocupada por una serie de líneas de interferencia más débiles, que imitan la orientación y curvatura de las más brillantes; en algún sitio puede verse también una pequeña imagen brillante de la misma lámpara.

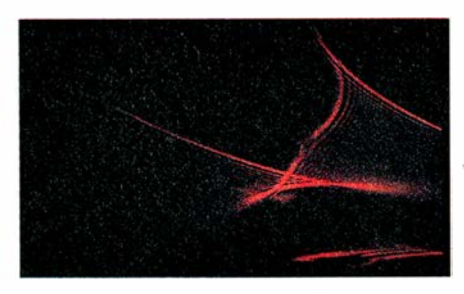
Cuando una gota gruesa cuelga del vidrio balanceándose, la parte superior de la imagen que vemos es convexa hacia afuera y en su proximidad hay pocas cúspides o ninguna. Muy cerca del borde se encuentran unas "estrellas" diminutas y brillantes. Su visibilidad queda reducida por las líneas de interferencia, pero hacemos que bailen agitando suavemente el vidrio. Si podemos rotar el vidrio en torno a nuestra visual, fijémonos en una de las cúspides. Conforme se aproxima a la parte superior de la figura, la veremos encogerse para luego penetrar en el interior de la misma convirtiéndose en una estrella.

Aunque la variedad de figuras nos parezca infinita, un examen atento nos revelará que, en realidad, se componen de un puñado de tipos básicos pertenecientes al conjunto de "catástrofes elementales". El estudio de las figuras pone asimismo de manifiesto algo más sustancioso: las catástrofes que se observan a través de una gota son secciones transversales de estructuras tridimensionales, las cuales, a su vez, son secciones practicadas en estructuras matemáticas de más dimensiones. Varios investigadores han estudiado esas relaciones; entre ellos destacan M. V. Berry y J. F. Nye, de la Universidad de Bristol. Aquí vamos a pasar revista a sus descubrimientos, e incluiremos otros que debemos a mi colega de la Universidad estatal de Cleveland James A. Lock y a su alumno James H. Andrews. Voy a describirles también un sencillo experimento con el que podrán contemplar las figuras más sorprendentes que yo he podido ver hasta hoy.

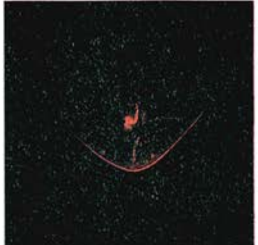
Antes de ocuparnos de las gotas adheridas a superficies verticales, empecemos por examinar qué ocurre con las que descansan sobre superficies horizontales (en cuyo caso, las líneas brillantes son siempre cóncavas hacia afuera). Imaginemos una gota en un portaobjetos de microscopio iluminado desde abajo por rayos de luz verticales. Siempre que un rayo de luz atraviesa una superficie inclinada, se refracta; o sea, cambia su dirección de propagación. En nuestro caso los rayos encuentran una superficie inclinada al llegar a la superficie superior de la gota. Para ver lo que pasa, consideremos una sección vertical de la gota [*figura 4*]. En todos los puntos de la sección, la superficie de la gota es convexa hacia afuera. Elijamos un punto cualquiera de la curva, tracemos por ese punto una tangente a la superficie y luego construyamos una "normal", es decir, una recta perpendicular a la tangente. Si la normal está inclinada hacia la izquierda respecto a la vertical, los rayos que pasen por ese punto se refractarán hacia la derecha. Si tomamos otro punto cuya normal esté más inclinada hacia la izquierda, los rayos que pasen por allí se desviarán más hacia la derecha.

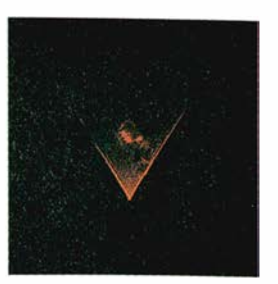
Con un láser puede verse lo que resulta de estas refracciones. Tendamos un portaobjetos de microscopio entre dos cajas de igual altura. Pongamos una gota en el portaobjetos y coloquemos debajo un espejo que refleje hacia arriba el haz de láser para que pase a través de la gota. Para hacer patente la luz reflejada, sosténgase horizontalmente una cartulina blanca por encima de la gota. Si la base de ésta es perfectamente circular, todos los rayos viajarán a lo largo de un "eje central" que atraviesa verticalmente el centro de la gota; es probable que se vea sobre la tarjeta un solo punto brillante, allá donde parte de los rayos queden enfocados. Si el portaobjetos estuviera sucio o rayado, la base circular de la gota aparecerá alterada por diminutas irregularidades; en ese orden, una mota de polvo puede producir un "saliente" o un "entrante" en el perímetro. Ambas irregularidades crean, en el contorno de la gota, unos picos y unos vientres que alteran la refracción de la luz. Pero si no hay más que una o dos irregularidades, la superficie de la gota en cualquier sección vertical sigue siendo convexa, incluso en un pico o en un entrante, y la luz continúa sin producir nada en particular en la cartulina.

La cosa se anima cuando concurren



1. Catástrofes fotografiadas en luz láser: estrellas (izquierda) *y una cola de milano* (derecha).

2. Evolución de una figura catastrófica.

al menos tres irregularidades. Entonces, su acción deforma de otro modo la curvatura de la superficie del agua. Según cierta sección vertical, la superficie ha dejado de ser completamente convexa hacia afuera para presentar una porción cóncava. El punto donde coinciden las curvaturas cóncava y convexa recibe el nombre de punto de inflexión. Estas inflexiones no aparecen aisladas, sino que caen sobre una línea que circunvala a la gota junto a su base.

Cuando los rayos atraviesan la región próxima a una inflexión, la refracción los agrupa y enfoca a lo largo de un trayecto inclinado que se prolonga por encima de la gota. Si con una cartulina se intercepta parte de esa luz enfocada, la concentración correspondiente a cada punto de inflexión origina un punto brillante en el cartón y la sucesión de esos puntos forma una línea brillante que recibe el nombre de pliegue y que constituye la más simple de las catástrofes elementales. Como los rayos refractados están inclinados respecto al eje central, el pliegue y la porción de la línea de inflexión que lo genera se encuentran cada uno a un lado del eje central: la figura está invertida respecto a la gota.

La distancia horizontal entre un segmento del pliegue y el eje depende de la inclinación de las normales en la parte de la línea de inflexión que da lugar a ese segmento del pliegue. Si las normales están poco inclinadas, lo mismo les ocurrirá a los rayos, y el segmento correspondiente del pliegue se encontrará cerca del eje. Cuando las normales están algo más inclinadas, el segmento del pliegue está más separado. Así, pues, la forma del pliegue depende de cómo varía la inclinación de las normales a lo largo de la línea de inflexión que rodea la gota.

En la figura 6 se representa una vista en planta de una gota, en la que se ha dibujado la línea de inflexión; las irregularidades están muy exageradas. Cuando la línea de inflexión pasa por *a* y se acerca al entrante por la izquierda, la tensión superficial la desplaza gota arriba para que no tenga que atravesar el vientre que forma el fondo del entrante. En ese trayecto, las normales a la línea de inflexión se van inclinando cada vez más. El pliegue resultante está rotulado con una *A* en la ilustración derecha de la figura 6, donde se muestra lo que veríamos si mirásemos la gota por una cartulina traslúcida que colocásemos por encima. Otro segmento de la línea de inflexión pasa por *c* y se acerca al entrante por la derecha. Ese segmento también se desplaza gota arriba y produce el pliegue rotulado con una *C*. Las dos líneas de inflexión se reúnen en *b* y sus pliegues convergen en una cúspide (*B*), otra de las catástrofes elementales.

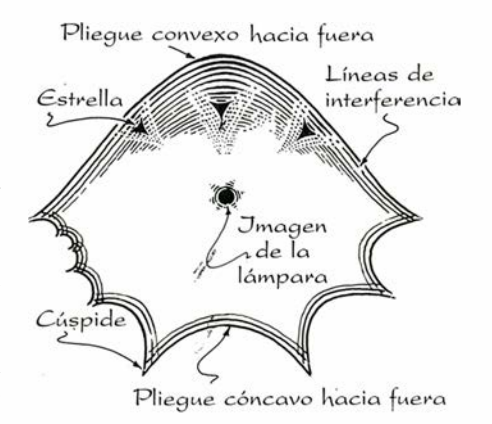
Una irregularidad que dé lugar a un saliente provoca unos efectos similares, puesto que posee una vaguada en cada costado, allá donde el perímetro de la base se hace cóncavo cuando comienza a curvarse hacia afuera. Un saliente puede crear dos cúspides que se solapen, o bien, si es ancho, dos cúspides separadas.

Pliegues y cúspides son, en realidad, secciones de sendas catástrofes tridimensionales. Estas dos estructuras son la "cola de milano" (una parte de ella recuerda a la cola de ese ave) y la "umbílica elíptica", las cuales se ilustran en las figuras 7 y 8. Se han representado en perspectiva, con sus ejes mayores alejándose del observador, de tal manera que si las ilustraciones fueran aplicables a una gota depositada en una superficie horizontal, cada eje mayor quedaría vertical. Una cartulina que se sostuviera horizontalmente por encima de la gota interceptaría una sección transversal de la estructura, o sea, una rebanada perpendicular al eje mayor. Lo que veríamos en la cartulina sería la parte de la estructura que interceptase.

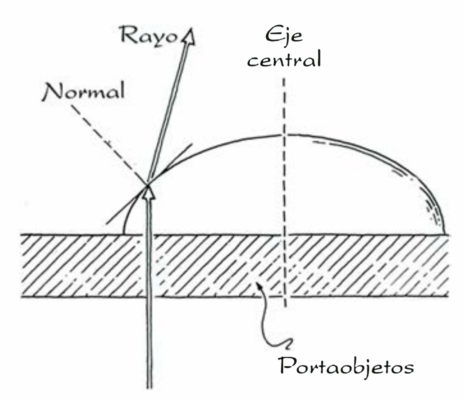
Imaginemos qué sucede al realizar mentalmente una serie de tales rebanamientos en la cola de milano, comenzando por el lado derecho de la ilustración y desplazándonos hacia la izquierda. Los primeros cortes dan lugar a pliegues convexos hacia afuera que no ofrecen pista alguna de la presencia de la cola de milano; pero, andando el tiempo, la figura en forma de cola comienza a dibujarse e inmediatamente a crecer. Del punto en que la figura comienza a emerger se dice que es la "singularidad" de la cola de milano. Este ejercicio mental de desplazar el rebanamiento a lo largo de la longitud de la estructura de una catástrofe, empezando por la singularidad, es lo que se llama "desdoblar la catástrofe". ¿Podemos ver una cola de milano desdoblada sobre la cartulina cuando la gota yace en una superficie horizontal? Las probabilidades son escasas, pues una pequeña figura en cola se perdería en la maraña de líneas de interferencia y las curvaturas de las superficies del agua acostumbran ser demasiado suaves para que resulten figuras de mayor tamaño.

Probemos ahora, también mentalmente, el mismo desdoblamiento con la umbílica elíptica. En este caso, la singularidad es un punto y la figura desdoblada es un conjunto de tres cúspides y tres pliegues cóncavos hacia afuera, dispuestos triangularmente. La figura desdoblada revelaría la presencia de la catástrofe, pero tampoco aquí las irregularidades logran generar algo de entidad suficiente para que resulte visible. (Puede que estas ideas de las colas de milano y las umbílicas elípticas no desdobladas parezcan evanescentes, pero ténganse presentes ante lo que viene ahora.)

La tercera y última catástrofe tridimensional es la umbílica hiperbólica,



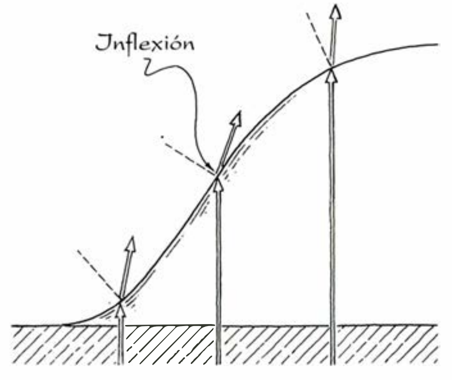
3. Imagen catastrófica producida por una gota que cuelga.



4. Refracción en una gota de agua.

que también se representa en la figura 9. Su singularidad se compone de dos pliegues rectos que concurren en un vértice de 60 grados. Esta catástrofe, conforme la desdoblamos partiendo de la singularidad, produce una figura dividida en dos partes. Una de éstas es un pliegue convexo hacia afuera. Hay en su interior una cúspide donde concurren dos cortos pliegues cóncavos hacia afuera. La presencia de la catástrofe la señalan tanto la singularidad como la figura sin desdoblar. Ahora bien, ninguna de éstas puede observarse en una gota depositada en una superficie horizontal; y no porque sean demasiado pequeñas, sino porque las gotas horizontales carecen de la forma adecuada para crearlas.

Ocupémonos ahora de una gota adherida a un vidrio plano vertical, aunque primero aclararemos un extremo que pudiera inducir a confusión. En los ejemplos precedentes hemos supuesto que la imagen está invertida respecto a la gota. Cuando miramos una lámpara lejana, a través de una gota situada exactamente delante de nuestro ojo, no apreciamos inversión. Por ejemplo, la base de la imagen procede de la base de la gota. Esta falta de inversión es ilusoria. La imagen que se produce en la retina está realmente invertida, lo mismo que en la cartulina, pero el cerebro introduce una segunda inversión, por lo que el universo entero, incluidas la gota y la figura que genera, aparecen boca arriba.



5. Refracción en la vecindad de una inflexión.

Cuando la gota se encuentra en una superficie vertical, las catástrofes tridimensionales se desdoblan perceptiblemente a causa del aplastamiento de la gota y de las curvaturas superficiales más pronunciadas, que son resultado de la tensión superficial. Recordemos lo que se ven en el cristal de las gafas. Cuando la gota es pequeña, aparecen cúspides y pliegues cóncavos hacia afuera, que, si la gota está apreciablemente deformada, pueden solaparse y formar una cola de milano sin desdoblar. Cuando la gota cuelga, las cúspides y los pliegues cóncavos hacia afuera quedan limitados a la parte inferior de la figura y resultan de las irregularidades que se hallan en la porción más baja de la base de la gota. La parte superior de la figura, que procede de la parte superior de la gota, es un pliegue convexo hacia afuera con estrellas internas.

Este pliegue es engañoso; se trata de la parte externa de una umbílica hiperbólica no desdoblada. Cada estrella procede de una umbílica elíptica levemente desdoblada, aunque sólo de un modo disfrazado. Está presente la estructura triangular de la catástrofe (con una cúspide apuntando hacia abajo), pero sus pliegues producen unas líneas de interferencia que discurren perpendicularmente a través de los pliegues. Lo que percibimos es una distribución triangular e invertida de las líneas de interferencia, con una cúspide apuntada hacia arriba.

Nye consiguió desdoblar la umbílica hiperbólica (incluso la parte interna) y la umbílica elíptica. Para ello pegó varias capas de cinta adhesiva opaca a un portaobjetos de microscopio, practicando un orificio en ellas que llenó con una gota de agua; seguidamente, montó el portaobjetos, vertical o inclinado, en un microscopio. El orificio hacía las veces de asidero para la gota. Cuando el orificio era circular, aseguraba, asimismo, que la base de la gota fuese circular pese a la inclinación del portaobjetos. Las irregularidades del borde del orificio producían las catástrofes. Ajustando el foco del microscopio, podía controlar exactamente en qué lugar seccionaba la luz delante de la gota. De las vistas de este tipo se dice que están en el "campo próximo"; de las vistas tomadas con una cartulina o un ojo, en el "campo lejano".

Me planteé así la posibilidad de que el truco del asidero me permitiera ver catástrofes no desdobladas en el campo lejano. Para comprobarlo no empleé cinta adhesiva, sino que me procuré una plantilla de plástico para dibujo técnico con círculos taladrados y separé uno de 2,8 milímetros de diámetro. Apliqué pegamento a una de las caras de esa plantilla con un solo círculo, coloqué esa cara sobre una hoja de papel para eliminar el pegamento sobrante y luego comprimí la plantilla sobre un portaobjetos, con cuidado de no ensuciar de pegamento la abertura circular.

Cuando el pegamento se hubo secado, limpié el reverso del portaobjetos y soplé con aire comprimido la abertura para limpiarla. Seguidamente dispuse el portaobjetos verticalmente en un haz de láser, hincando uno de sus extremos en un pegote de arcilla de modelar. El haz, ensanchado por una lente, iluminaba una superficie un poco mayor que la abertura y luego proseguía varios metros hasta llegar a una pared blanca. La abertura la llené con agua del grifo, simplemente poniéndola en contacto con una gota suspendida de la punta de una jeringa (también hubiera servido un cuentagotas) y sequé el agua rebosante en torno a la abertura con papel de seda. Estos preparativos sólo me llevaron 15 minutos, y cuando apagué las luces me encontraba con el ánimo dispuesto para pasarme un buen rato en busca de catástrofes no desdobladas.

Pero no fue así. Al primer intento, quedé atónito. La parte superior de la imagen, de un metro de ancho, que apareció en la pared (y que procedía de la base de la gota, es decir, de la base del círculo) se componía de las habituales cúspides y pliegues cóncavos hacia afuera. Para mi sorpresa, la parte inferior de la figura que veía proyectada en la pared era similar a la superior, cosa muy distinta de lo que yo esperaba a tenor de lo ensayado con las gafas.

Extasiado, me quedé observando mientras la gota comenzaba a evaporarse y su curvatura cambiaba. Todas las cúspides situadas en la parte inferior de la figura se contrajeron, "traspasaron" el pliegue y se transformaron en umbílicas elípticas no desdobladas, disfrazadas de estrellas [*figura 10*]. La cúspide situada más abajo, junto con su estrella asociada, abrió la marcha. El pliegue abandonado más abajo se enderezó y, en compañía de las estrellas, se desplazó hacia arriba. Por mi parte, tenía la sensación de estar contemplando algo dotado de vida.

No tardaron en dejarse ver las cúspides de la umbílica elíptica oculta de

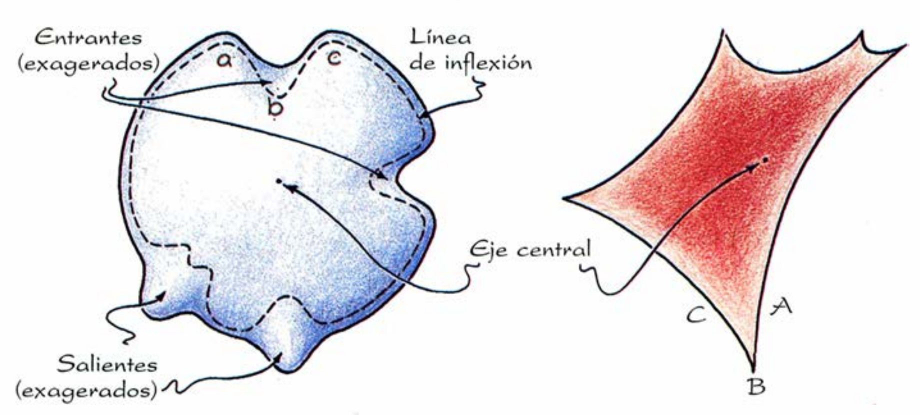
la estrella que había iniciado el movimiento. Dos de estas cúspides se curvaban hacia arriba, como los cuernos de un toro; la inferior crecía hacia abajo. Para entonces el pliegue se había vuelto convexo hacia afuera. Al cabo de unos minutos la recién aparecida umbílica elíptica se reorganizó convirtiéndose en la estructura interna de una umbílica hiperbólica sin desdoblar; consistía ésta en un vértice apuntado hacia abajo cuyos lados eran sendos pliegues enderezados. La estructura se deplazaba hacia abajo, mientras que el pliegue situado en la parte inferior de la figura avanzaba hacia arriba. Cuando se encontraron, encajaron limpiamente formando un vértice con lados rectos de 60 grados, o sea, la singularidad de una umbílica hiperbólica. Después la figura se dividió en dos partes; una se convirtió en un pliegue convexo hacia afuera y, la otra, en un vértice interior de lados curvos. ¡Me había sido posible observar el desdoblamiento completo, de principio a fin, de la umbílica hiperbólica, así como su transformación a partir de una umbílica elíptica sin desdoblar!

Trasladé a una ventana el portaobjetos y su montura, volví a llenar la abertura y luego dirigí la vista, a través de la gota, hacia una lejana farola que se distinguía en la oscuridad. Esta vez el espectáculo fue minúsculo y transcurrió en orden inverso al que había tenido lugar en la pared, y con luz blanca en vez de láser rojo, pero no fue menos intrigante. Otros pequeños círculos recortados de la plantilla me dieron también buenos resultados.

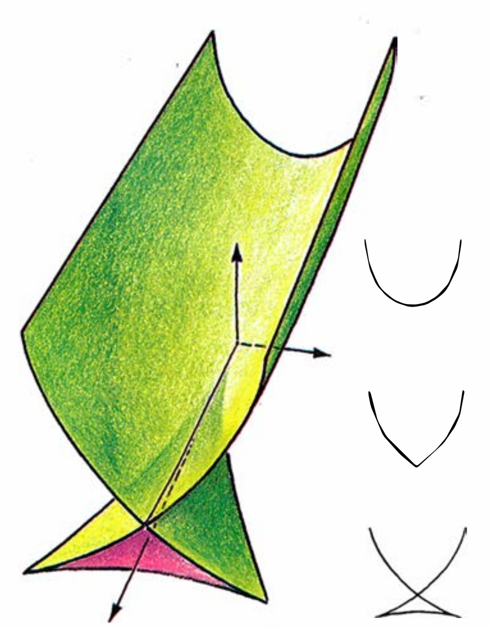
Cuando posteriormente Lock y yo observamos un comportamiento similar, descubrimos que lo que yo había visto era sólo el primer acto de la función. En ese primer acto, las transformaciones puestas en escena estaban dominadas por las líneas de inflexión de la parte superior de la gota. (Cuando tapábamos la parte superior de la gota poniendo un cartón en el haz de láser, desaparecía la parte inferior de la imagen en la pared.) El segundo acto era como el primero, pero al revés; su puesta en escena estaba dominada por las líneas de inflexión de la parte inferior de la gota. En el primer acto, aparecía invertida en la pared la imagen dada por la gota; en el segundo acto, la evaporación había hecho que la superficie del agua descendiera de nivel dentro de la abertura y la nueva curvatura enderezara la imagen.

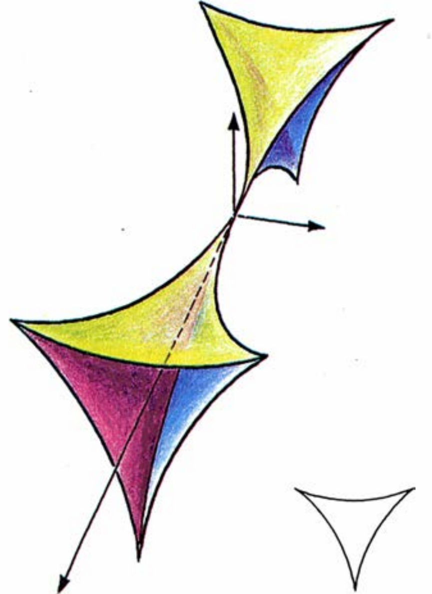
Repasemos rápidamente el desarrollo del espectáculo. La acción comienza cuando las cúspides de la parte inferior retroceden a través del pliegue inferior y se convierten en estrellas. Recuérdese que una estrella oculta un agrupamiento triangular de pliegues y cúspides, una de éstas apuntada hacia abajo. Cuando la primera estrella empieza a transformarse en un vértice, los pliegues de los lados derecho e izquierdo del triángulo salen de su escondite y comienzan a enderezarse para crear el vértice.

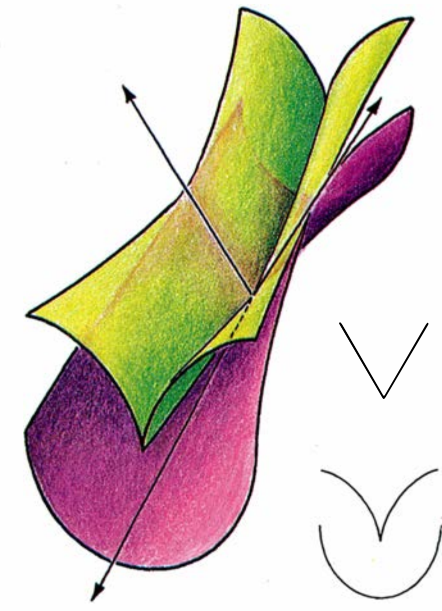
Mientras, el pliegue superior del triángulo asciende por la pared, sale de su escondite y brota del mismo una cúspide hacia arriba. Esta cúspide es un retoño de la que creó la estrella, pero con la orientación opuesta. Por ejemplo, si la cúspide original orientada hacia abajo se encontraba en el lado izquierdo de la imagen proyectada en la pared, su retoño –orientado hacia arriba– se encontrará en el lado derecho. Conforme otra estrella sufre esa transformación, su vértice se alinea con el primer vértice y brota otra cúspide. A medida que se transforman más estrellas, se ilumina más la figura de vértices formada en la pared y en la zona de los

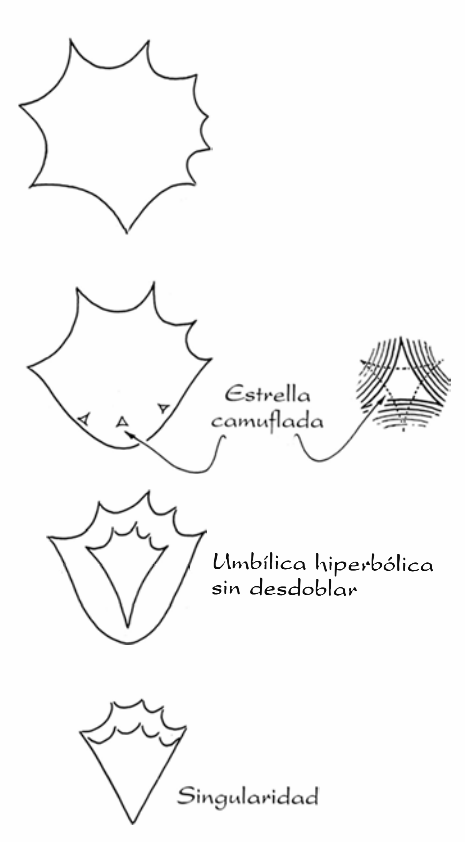


6. *Vistas en planta de una gota (*izquierda*) y su imagen catastrófica (*derecha*).*


7. *Catástrofe en cola de milano.*


8. *Catástrofe umbílica elíptica.*


9. *Catástrofe umbílica hiperbólica.*



10. Metamorfosis de la imagen proyectada en la pared.

retoños las cúspides se acumulan hasta agolparse. La estructura interna de la imagen vista en la pared acaba pareciéndose a un helado de cucurucho con púas que sobresalen del borde.

Mientras tanto, la estructura externa se contrae y adquiere la misma forma cónica. La singularidad umbílica hiperbólica se alcanza cuando las partes inferiores de los conos están completamente rectas y se solapan. Se invierten entonces los papeles de las dos estructuras: lo que había sido estructura externa sigue encogiéndose, mientras que lo que había sido estructura interna continúa dilatándose. Esta empieza a desprender una multitud de estrellas nuevas, cada una de las cuales se desplaza pared abajo, atraviesa el pliegue inferior de la nueva estructura externa y se convierte en una cúspide. La imagen final que queda en la pared es en gran parte una inversión de la inicial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OPTICAL CAUSTICS IN THE NEAR FIELD FROM LIQUID DROPS. J. F. Nye en *Proceedings of the Royal Society of London*, Serie A: *Mathematical and Physical Sciences*, vol. 361, n.º 1704, págs. 21-41; 3 de mayo de 1978.

CATASTROPHE OPTICS: MORPHOLOGIES OF CAUSTICS AND THEIR DIFFRACTION PATTERNS. M. V. Berry y C. Upstill en *Progress in Optics*, vol. 18. Dirigido por Emil Wolf. Elsevier North-Holland, 1980.

Juegos de ordenador

Las máquinas de Turing y las tur-mitas operan en un plano

A. K. Dewdney

"[La termitas]... modelan y alteran la faz de un paisaje como ningún otro organismo, a excepción del hombre."

—WALTER LINSENMEIER, *Insects of the World*

A no dudar, quien haya tenido ocasión de ver un termitero habrá quedado impresionado por la compleja red de túneles creada por estos insectos industriosos, pero sin inteligencia. Paradójicamente, ciertos seres "vivos" artificiales, a cuyo lado las termitas pasarían por verdaderos genios, logran producir creaciones no menos pasmosas. Fijémonos, por ejemplo, en las tur-mitas. Se trata de criaturas cibernéticas, cuadrangulares y dotadas tan sólo del más rudimentario de los cerebros. Y, sin embargo, en sus idas y venidas por el plano infinito donde moran, van trazando extrañas pautas que parecen reflejo de un diseño subyacente, fruto de una inteligencia.

Las tur-mitas fueron inspiradas, en parte, por Greg Turk, alumno de segundo ciclo de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Turk ha estado experimentando, durante algún tiempo, con un tipo especial de máquina de Turing, una construcción que ha servido, desde hace largo tiempo, como modelo básico para el estudio de la computación. De ordinario, se supone que una máquina de Turing opera sobre una cinta lineal infinita dividida en casillas. Turk, sin embargo, ha estudiado máquinas de Turing que operan sobre una especie de cinta bidimensional, en esencia, el mismo plano por el que vagabundean las tur-mitas. La conversión de una máquina de Turing bidimensional en una tur-mita se efectúa por un procedimiento sencillo y rápido: las reglas abstractas se sustituyen directamente por una red neuronal. Tal conversión pone de relieve un tema importante de la teoría de computación, a saber, que, con frecuencia, un esquema computacional resulta ser equivalente a otro que, a primera vista, no tiene relación con él.

Las máquinas de Turing reciben su nombre del matemático inglés Alan M. Turing, el primero en proponerlas como método para definir la computación. La verdad es que una máquina de Turing es la máquina de computación digital definitiva. Puede computar todo cuanto pueda computar un moderno ordenador, con tal de que se le conceda suficiente tiempo.

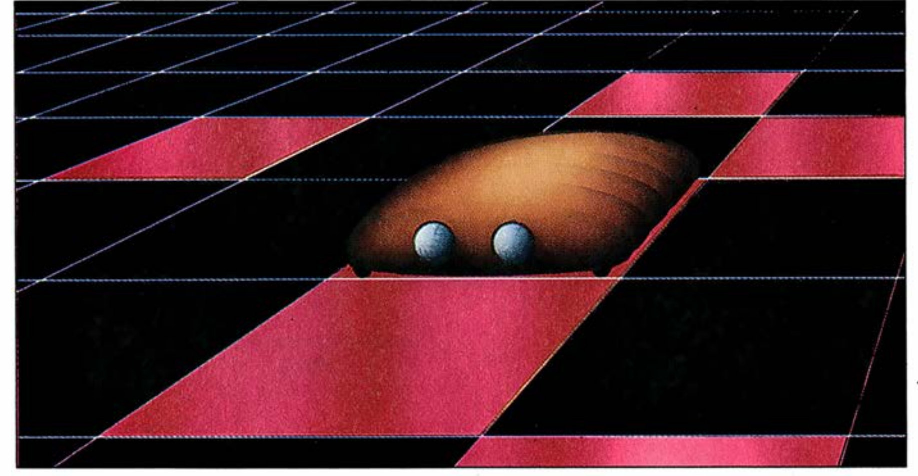
Podemos representar una máquina de Turing como en la figura 2: una caja negra equipada con un dispositivo que lee el símbolo de una casilla individual de una cinta infinitamente larga, escribe un símbolo nuevo en la casilla y desplaza la cinta sea hacia adelante o hacia atrás, con el fin de examinar el símbolo de una casilla adyacente. ¿Qué hay en el interior de la caja negra? Poco importa, en realidad, mientras la caja se atenga estrictamente a una tabla dada que enumera lo que la máquina de Turing ha de hacer para cada uno de los símbolos leídos y cada uno de los posibles "estados" internos de la máquina, los cuales, por otra parte, pueden cambiar con cada ciclo de funcionamiento. Cada ciclo consta de los tres pasos siguientes:

1. Lectura del símbolo situado en ese momento bajo el dispositivo de lectura/escritura.
2. Consulta a la entrada de la tabla determinada por el estado actual de la máquina y el símbolo leído.
3. Escritura del símbolo dado por la entrada de la tabla, desplazamiento de la cinta en la dirección indicada y paso al estado señalado.

En consecuencia, cada entrada de la tabla consta de tres partes: un símbolo que ha de escribirse en la casilla actual, una dirección en la cual se ha de mover la cinta y un estado al que pasar.

Para una máquina de Turing, el desplazamiento de la cinta es relativo. Se podría disponer, con igual facilidad, que la cinta permaneciera fija y la máquina fuera moviéndose de casilla en casilla. Y, de hecho, en cuanto se contempla la idea de ir moviendo la máquina de Turing y no su cinta, no se precisa mucha imaginación para visualizar una "cinta" bidimensional, sobre la cual la máquina pueda irse moviendo libremente.

Independientemente de que tenga cinta uni o bidimensional, es la tabla de la máquina de Turing la que, en definitiva, determina su conducta. La tabla se asemeja bastante al programa que controla un ordenador digital moderno. Medidas en capacidad computacional, las máquinas de Turing bidimen-



1. Las tur-mitas ocupan una casilla por vez.

sionales no son más potentes que las unidimensionales. Lo que sí ofrecen son pautas más interesantes de movimiento sobre las casillas. La pauta que vemos en la figura 3, por ejemplo, fue realizada por una máquina de Turing bidimensional monoestado. Su tabla interna es:

	NEGRO	ROJO
A	(ROJO, IZQUIERDA, *A*)	(NEGRO, DERECHA, *A*)

El único estado de la máquina ha sido rotulado *A*.

Una máquina de Turing bidimensional un poco más complicada, descubierta por Turk, tiene dos estados, designados *A* y *B*, y obedece a la siguiente tabla interna:

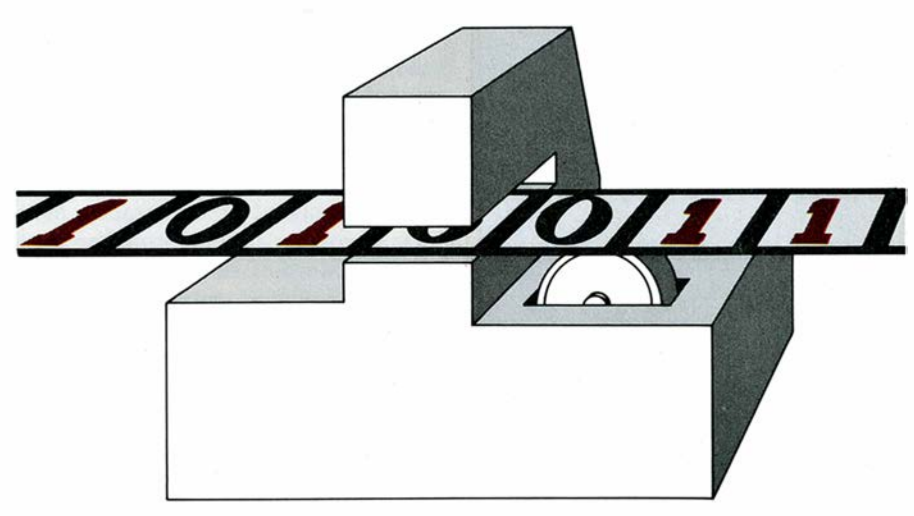
	NEGRO	VERDE
A	(VERDE, IZQUIERDA, *A*)	(NEGRO, ADELANTE, *B*)
	(VERDE, DERECHA, *B*)	(VERDE, DERECHA, *A*)

Según Turk, una máquina de Turing bidimensional programada con esta tabla produce una maravillosa pauta en espiral. La máquina crea "regiones estructuradas cada vez mayores, ordenadamente situadas en torno al punto de partida".

Cualquier pauta generada por una máquina de Turing bidimensional puede reproducirse exactamente con una tur-mita. Sin embargo, la conducta de una tur-mita no está controlada por una misteriosa caja negra. Está controlada por lo que, hablando sin precisión, podríamos describir como un cerebro. Es justamente el hecho de que uno pueda examinar y diseccionar el cerebro de una tur-mita lo que hace tan fascinante a esta criatura.

Juzgada solamente por su apariencia y etología, la tur-mita no tiene gran cosa de fascinante. Su cuerpo es burdamente cuadrado, por lo que encaja en los cuadrados que dividen el plano infinito donde vive. Su vientre es plano y está equipado con alguna clase de aparato locomotor. (Ignoro cómo andan las tur-mitas, pues nunca le he dado la vuelta a ninguna.) Este aparato locomotor permite a la criatura girar y avanzar exactamente un cuadrado en la dirección en que en ese momento esté mirando. En realidad, la cara de una tur-mita no tiene más propósito que el de hacernos saber cuál es el sentido de avance; sus "ojos" no funcionan. Para cambiar de dirección, la tur-mita se limita a girar sobre sí misma 90 grados en su casilla, antes de desplazarse a otra nueva.

Inicialmente, todos los cuadrados del plano, inclusive el ocupado por la tur-



2. Representación habitual de una máquina de Turing.

mita, son negros. Sin embargo, antes de moverse, una tur-mita puede cambiar el color de la casilla que en ese momento ocupa. (El órgano de cambio de color de la tur-mita es tan misterioso como su aparato locomotor.) Una turmita que reproduzca, por ejemplo, el motivo mostrado en la figura 3 ha de ser capaz de pintar el cuadrado de uno de los dos colores posibles (en este caso, rojo y negro). En cambio, para producir el motivo que vemos en la figura 4, la tur-mita ha de tener más colores en su paleta.

¿Cómo sabe una tur-mita que ha de moverse o que debe cambiar el color de su cuadrado? Tales acciones están controladas por su cerebro, que consiste en una colección de "neurodas", versión simplificada de las neuronas de nuestros propios cerebros. Una neuroda recibe, a lo largo de fibras, las señales que se originan en los sensores (situados en el vientre de la tur-mita), o en otras neurodas, y envía, por igual medio, señales hasta los ejecutores (como su aparato locomotor o su órgano pintor) o a otras neurodas.

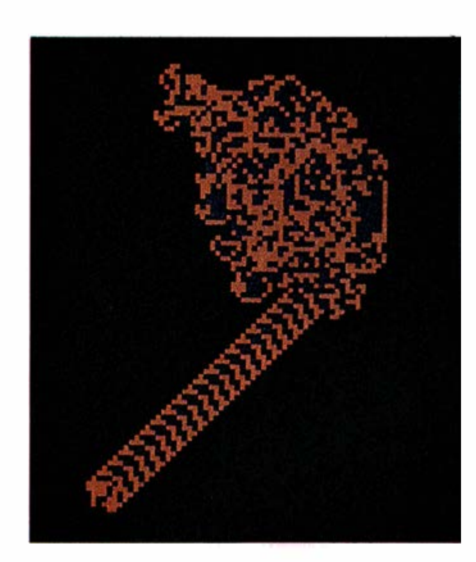
La neuroda se excita, emitiendo una señal a lo largo de su fibra de salida, cuando el número de señales que le llegan es igual o mayor que el umbral de la neuroda, que está dado por el número escrito sobre ella. En caso contrario, no se excita. Dado que en el mundo de la tur-mita el tiempo avanza a pasos discretos, todas las señales excitadoras e inhibidoras se envían o reciben igualmente en pasos discretos.

Al objeto de ilustrar cómo llega una tur-mita a tomar una decisión, diseccionaré el cerebro de dos especímenes [*véanse los dibujos izquierdo y central de la figura 5*] que generan exactamente el mismo motivo que el creado por la máquina de Turing bidimensional monoestado antes descrita. El cerebro de la izquierda contiene dos neurodas que no están conectadas entre sí. Cada neuroda tiene exactamente una fibra de entrada y una fibra de salida. Cuando el sensor de color de la tur-mita detecta rojo, envía una única señal a la neuroda izquierda, activándola y haciéndole emitir una señal. La fibra de salida de la neuroda izquierda se escinde en dos, una que va al ejecutor de color (que procede entonces a colorear el cuadrado completo) y la otra al aparato locomotor (que se encarga de hacer girar la criatura 90 grados a la derecha e insta su avance un cuadrado en la nueva dirección). Por otra parte, cuando el sensor de color de la tur-mita detecta negro, envía una señal a la neuroda derecha, provocando su activación.

La salida de la neuroda, a su vez, hace que la tur-mita pinte el cuadrado de rojo antes de girar y se encamine al cuadrado de su izquierda.

En breve, cuando la tur-mita se encuentre a sí misma sobre un cuadrado rojo, colorea el cuadrado de negro y después se mueve un cuadro hacia la derecha. Y cuando la tur-mita ocupa un cuadrado negro, cambia su color a rojo y después gira hacia la izquierda y avanza un cuadrado en su nueva dirección.

El segundo cerebro de tur-mita es más complicado, pero efectúa exactamente las mismas funciones que el primero. Fue deducido por un procedimiento que describiré de seguido. Las dos neurodas tienen ambas umbral 2; ninguna de ellas se excitará hasta que reciba dos señales de entrada en el mismo incremento de tiempo. En cuanto el cerebro se ponga en movimiento, siempre habrá una de las neurodas que se active en cada unidad de tiempo.



3. Uno de los motivos creados por Turk.

El sencillo comportamiento concretado en los dos circuitos neurodales recién descritos tiene por resultado la complicada imagen de la figura 3: una nube roja de cuadraditos diminutos de la cual emana una complicada estructura que se prolonga en línea recta hacia el infinito. ¿Por qué, de súbito, parece la tur-mita poseer una meta en su vida y saber adónde va, tras tantísimas idas y venidas a la deriva? La respuesta tiene que ver con la disposición de cuadros de colores de la nube. En cierto punto, parte del motivo, en combinación con las reglas que gobiernan las neurodas de la tur-mita, atrapan a la criatura en una sucesión repetitiva de movimientos que teje la estructura. (Me pregunto si habrá lectores que descubran la pauta desencadenante.)

Así es la vida de las tur-mitas. A veces, un zigzagueo aparentemente aleatorio se convierte en determinismo casi mortal. Como es obvio, la apariencia de aleatoriedad es mera ilusión. Todas las tur-mitas son decididamente deterministas en cualquier momento.

Hay, empero, misterios que descubrir en el mundo de las tur-mitas. Fijémonos, por ejemplo, en la pauta mostrada en la figura 4. La tur-mita que trazó ese motivo está provista de cuatro ejecutores que cambian el color de un cuadrado en negro, rojo, amarillo o verde. Se adhiere inquebrantablemente a las siguientes reglas:

Color del cuadrado	Acción
negro	pintar de rojo, girar a la derecha
rojo	pintar de amarillo, girar a la derecha
amarillo	pintar de verde, girar a la izquierda
verde	pintar de negro, girar a al izquierda

Esta tur-mita tiene, asimismo, un cerebro muy sencillo. Consta de cuatro neurodas no interconectadas. Cada neuroda ejecuta una de las cuatro reglas de comportamiento, a la manera del simplicísimo cerebro de la primera tur-mita. Turk se encuentra desconcertado: esta tur-mita produce una pauta dotada de simetría axial. Tal vez algún lector pueda explicar a qué se debe eso.

¿Cuál es el procedimiento exacto por el que se obtiene una tur-mita a partir de una máquina de Turing bidimensional concreta? La técnica es, en realidad, muy simple. Basta reemplazar cada entrada de la tabla interna de la máquina por una neuroda de umbral-2 que reciba señales de entrada procedentes de un sensor asociado al color correspondiente a la columna de la entrada y, posiblemente también, de otras neurodas. Las fibras de salida de cada neuroda se dirigen a los ejecutores necesarios para llevar a cabo los movimientos y los cambios de color enumerados en la entrada de la tabla.

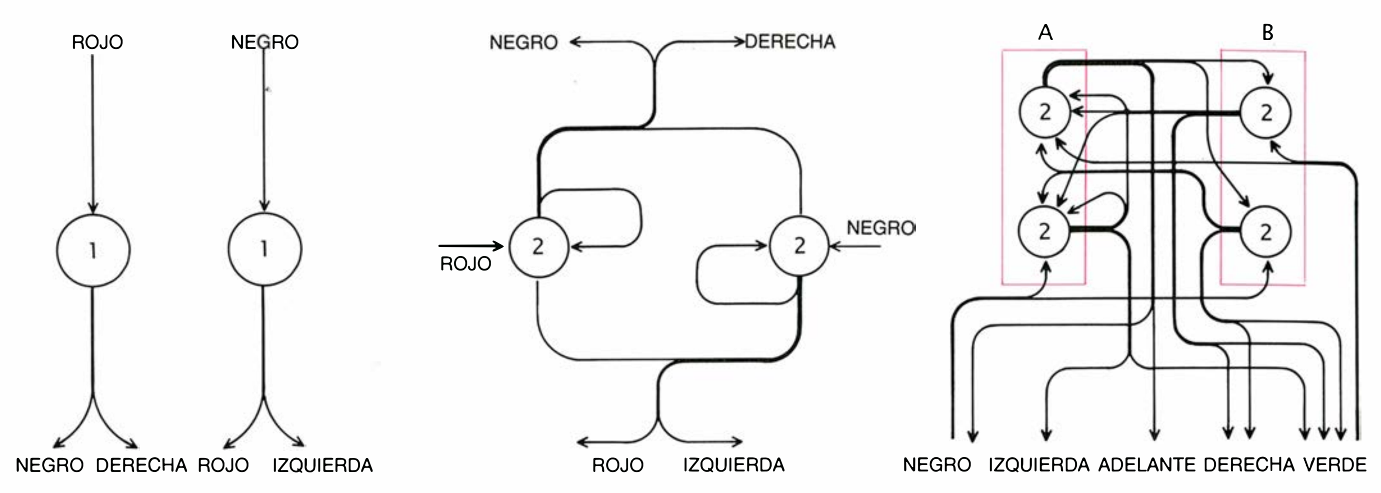
Por ejemplo, supongamos que una cierta neuroda sea la correspondiente a una entrada situada en la columna "roja" de la tabla y en la fila rotulada "*B*". De acuerdo con el esquema de conversión, la neuroda tendría una fibra de conversión procedente del sensor que detecta el rojo. Si la entrada de la tabla fuera, pongamos por caso (negra, izquierda, *B*), la neuroda enviaría una fibra de salida al ejecutor que colorea de negro el cuadrado ocupado, y al ejecutor que hace girar la tur-mita a la izquierda.

Los diversos estados de una máquina de Turing concreta se materializan mediante conexiones entre las neurodas del cerebro de la tur-mita. En vista de que, en el ejemplo, la entrada de la tabla exige que la tur-mita adopte el estado *B*, la neuroda representativa de dicho estado extendería fibras de salida hasta cada una de las neurodas que componen la fila *B* de la tabla.

En este contexto, tal red neuronal no es nada más (ni nada menos) que una forma de soporte físico que materializa una tabla de comportamiento. En los dibujos del centro y la derecha de la figura 5, se muestran ejemplos de conversión. El de la derecha enseña cómo proceder para construir el cerebro de la tur-mita que remeda el comportamiento de la máquina de Turing bidimensional ideada por Turk, que traza espirales.

Resulta entretenido observar el vagabundeo de una tur-mita (o de una máquina de Turing bidimensional) por un plano escaqueado. Sin embargo, para seguir la acción, el lector deberá redactar un programa de simulación de

4. Un motivo multicolor creado por una tur-mita.

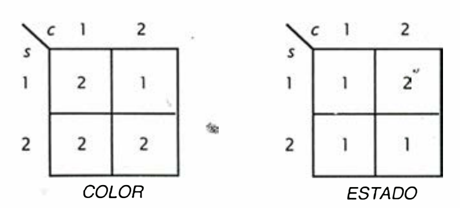


5. *Tres cerebros de tur-mitas, dos de los cuales (*izquierda y centro*) realizan el mismo trabajo.*

los movimientos de la tur-mita. ¿Cómo se pasa de una tabla a un programa?

Por fortuna, el proceso es casi tan sencillo como el diseño de un cerebro de tur-mita. Mi programa, al que llamaré TURMITA, consulta una tabla de Turing dada en forma de tres variables dimensionales independientes, *color*, *movimiento* y *estado*. Cada variable tiene dos índices, *c* y *s*. La variable *c* indica el color del cuadrado actual, mientras que la *s* indica el estado de la máquina de Turing (o de la tur-mita equivalente). Dado que se ha de asignar valores enteros a los índices, los colores y estados utilizados en la simulación han de estar numerados.

Por ejemplo, podemos asignar a la variable *c* los colores rojo y negro mediante los números 1 y 2, respectivamente. De manera análoga, los estados *A* y *B* pueden designarse por los valores 1 y 2 de la variable *s*. De ser así, una simulación de la tur-mita espiralizante exigiría las dos tablas siguientes:



COLOR

s \ c	1	2
1	2	1
2	2	2

ESTADO

s \ c	1	2
1	1	2
2	1	1

También es preciso codificar mediante números las direcciones de movimiento. Por tanto, adelante, atrás, izquierda y derecha podrían indicarse, respectivamente, por los números 1, 2, 3 y 4, que están contenidos en la tabla *mov* (imiento).

El objetivo fundamental de TURMITA es colorear en la pantalla del ordenador cuadraditos (píxeles individuales, posiblemente) que hagan resaltar el peripatetismo de las tur-mitas. El programa lleva control de los colores de los cuadrados encendidos mediante una matriz bidimensional llamada *motivo*. En un comienzo, tan sólo está encendido un cuadradito, el ubicado en el centro de la pantalla.

El valor de *c*, en cualquier momento dado, se obtiene por la entrada de la variable *motivo* correspondiente a las coordenadas que en ese momento tenga la tur-mita en la pantalla; sean éstas *i* y *j*. Con *c* y *s* entre manos, el programa se limita a consultar las entradas *color*(*c*,*s*), *mov*(*c*,*s*) y *estado*(*c*,*s*).

El programa cambia el color codificado en la entrada de *motivo*(*i*,*j*) y seguidamente altera *i* o *j*, a tenor del valor de *mov*(*c*,*s*). Llegado a este punto, el programa debe traducir el movimiento relativo codificado en *mov* en un movimiento absoluto, para lo cual consulta otra variable, *dir*, que contiene la última dirección movida: arriba, abajo, izquierda o derecha. El paso final en el ciclo de funcionamiento de TURMITA consiste, meramente, en cambiar *s* por el número de estado dado por *estado*(*c*,*s*). El resto puede quedar abierto a la imaginación, destreza e inventiva de los lectores.

Ya estemos construyendo un cerebro de tur-mita, o simulando su comportamiento en un ordenador, es interesante reflexionar en el hecho de que, puesto que las tur-mitas pueden llevar a cabo cualquier cómputo que una máquina de Turing sea capaz de ejecutar, las tur-mitas pueden ser tan potentes como algunos ordenadores. Y si, como algunos proclaman, el cerebro humano no es más que una especie de ordenador digital, ¡algunas tur-mitas podrían ser tan inteligentes como nosotros, si no más!

La evolución simulada, que fue tema de mi artículo de julio, provocó una correspondencia insólitamente copiosa. Varios centenares de lectores solicitaron copias de un algoritmo detallado sobre el cual fundar su propia versión del programa. Después de todo, no es corriente tener oportunidad de ver evolucionar a pretendidos protozoos hasta convertirse en devoradores de bacterias, en una hora o menos.

Michael Palmiter, el profesor de bachillerato californiano que desarrolló el programa, merece la hoja de palma por su creación. Se trataba, evidentemente, de una idea cuyo momento había llegado. Unos cuantos lectores que habían desarrollado, por cuenta propia, programas notablemente similares al de Palmiter quedaron barridos por la Evolución Simulada.

Un estudiante novato de secundaria, Máté Sztipánovíts, de Nashville, Tennessee, ganó toda clase de felicitaciones en las ferias de ciencias con un programa que simulaba una especie de insectos ovoidales que vagabundeaban por un espacio bidimensional, buscando comida dispersa al azar. En el programa de Sztipánovíts, el ambiente que rodea a las criaturas ejerce un arrastre, que los seres pueden hacer mínimo evolucionando hacia formas aerodinámicas.

Christopher O'Haver, de College Park, en Maryland, presentó también un programa de evolución simulada como proyecto para una feria científica. A diferencia de los bichos de Palmiter, los organismos del programa de O'Haver son estacionarios (se parecen más a las algas que a los protozoos), absorben alimento continuamente, crecen y sufren predación.

Paul H. Deal, de Moriarty, Nuevo México, ha desarrollado un programa de evolución bastante perfeccionado, que ha estado distribuyendo entre docentes. El genoma de sus criaturas consta de 13 genes que gobiernan características como la capacidad de la

criatura para nutrirse de sustratos orgánicos, para absorber energía y para moverse (aunque un tanto débilmente). Los lectores que deseen experimentar con el programa de Deal pueden disponer de él dirigiéndose a Deal, P.O. Box 1398, Moriarty, N. M. 87035.

Entre los lectores que pudieron echar a andar BIOS, mi versión simplificada del programa de Palmiter, con la magra descripción que di en el artículo, se contaban Lewis V. Glavina, de Burnaby, Columbia Británica, Ken Sheller, de Bellevue, Nebraska, Jim Henry, de De Kalb, Illinois, y Albert H. Behnke, de Boston, Virginia. Glavina, molesto por la cantidad de energía que suelen desperdiciar, a veces, los bichitos en los bordes de la pantalla, dio a sus protozoos el poder de saltar al otro lado de los bordes. Sheller recompensó específicamente al gen que aportaba máxima contribución a la conducta recolectora de alimento. Resultándole difícil distinguir a los bichitos francamente avanzados de sus cohortes menos evolucionadas, Henry coloreó a los bichitos de acuerdo con su tendencia a permanecer en un mismo lugar. Behnke dotó a sus bichos de una característica similar, haciendo que cambiasen de color al cambiar de dirección.

Finalmente, un nota sobre el artículo de junio. En dicho artículo, tomé amplios extractos de mi correspondencia con un tenebroso personaje que respondía al nombre de Arlo Lipof. Lipof sostenía haber hecho bajar el precio del oro valiéndose del teorema de Banach-Tarski para sacar oro de la nada. He recibido hace poco una carta, concebida en acerados términos, del llamado Consejo Internacional del Oro de la Ciudad de Nueva York, en la que se me hace responsable del "desorden" y del "hundimiento de la civilización" que podrían resultar de la divulgación del secreto de Lipof.

"Durante años, el Consejo Internacional del Oro se ha encargado de hacer inaccesible la paradoja de Banach-Tarski al público general... Hemos sabido siempre que la apolíptica realidad de crear más oro a partir de cantidades menores tendría lamentables consecuencias para el equilibrio internacional de los sistemas monetarios del mundo."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MATHEMATICAL GAMES. Martin Gardner en *Scientific American*, vol. 216, n.º 3, págs. 124-129; marzo de 1967.

MATHEMATICAL GAMES. Martin Gardner en *Scientific American*, vol. 229, n.º 5, págs. 116-123, noviembre de 1973.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



COLISIONADOR LINEAL DE STANFORD

Diciembre 1989
500 Ptas.

MICROSCOPIOS CON SONDA DE OBSERVACION
H. Kumar Wickramasinghe
Permiten estudiar la topografía y las propiedades atómicas de un objeto. Se están convirtiendo en instrumento ideal para el control de calidad en la industria microelectrónica.

LOS ORIGENES DE LAS LENGUAS INDOEUROPEAS
Colin Renfrew
La mayoría de las lenguas indoeuropeas descienden de un solo lenguaje ancestral. ¿De dónde procedía éste? Según el autor, serían los pueblos agricultores quienes difundiesen aquel lenguaje progenitor por Europa al irse trasladando para roturar más tierras.

EL CICLO DEL CALCIO COMO MENSAJERO INTRACELULAR
Howard Rasmussen
El calcio, componente estructural de los dientes, huesos y conchas, es un mensajero celular imprescindible. Pero no se concentra en las células, como se creía, sino que circula a través de sus membranas.

EL HUSO MITOTICO
J. Richard McIntosh y Kent L. McDonald
La célula no puede dividirse correctamente sin el huso mitótico, el haz de fibras diminutas que separa los cromosomas de la célula en dos grupos iguales.

EL COLISIONADOR LINEAL DE STANFORD
John R. Rees
Permite a los físicos acelerar electrones y positrones a alta energía y lanzarlos unos contra otros. ¿El resultado? Un instrumento que promete nuevos descubrimientos relativos a una fuerza fundamental de la naturaleza.

EL MONOXIDO DE CARBONO Y LA TIERRA EN LLAMAS
Reginald E. Newell, Henry G. Reichle, Jr. y Wolfgang Seiler
La presencia de monóxido de carbono en la atmósfera se achacaba a la actividad industrial del hemisferio Norte. Los autores demuestran que abunda también en el hemisferio Sur, a consecuencia de la quema de la pluviselva y la sabana.

SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS DE ALTA VELOCIDAD
A. Ferrer, E. Sanchis y A. Sebastià
La física de altas energías y sus grandes instrumentos han impulsado el desarrollo de sistemas electrónicos para controlar y adquirir datos de los experimentos. El último sistema que acaba de entrar en funcionamiento es el FASTBUS.

LA TRANQUILA SENDA HACIA LA PREEMINENCIA TECNICA
Robert B. Reich
Se anuncian ambiciosas "iniciativas" que estimulen el florecimiento de la rosa de la técnica. Para el autor, sería preferible una nueva política de acercamiento del diseño y el ensayo experimental a la fabricación industrial.



Libros

Los bosques, virología, zoología, espectrocospía y Chandrasekhar

Juan Gallardo, Luis Alonso, Rafael Alvarado, Javier Brey y Diego Pavón

EL LIBRO ROJO DE LOS BOSQUES ESPAÑOLES, por Carmen Ortega (coord.). ADENA/WWF España; Madrid, 1989.

Justifica la aparición de este libro el hecho de que "ADENA/WWF España considera que la protección de los bosques (españoles) constituye una de las acciones prioritarias de la conservación de la naturaleza de nuestro país..."; por eso ADENA/WWF España "ha reunido (en casi 400 páginas) a especialistas de primera línea que ofrecen un amplio panorama de nuestros bosques desde una multiplicidad de aproximaciones...". El objetivo de este *Libro rojo de los bosques españoles*, según ADENA/WWF España, es "propiciar una nueva política forestal española cuyo centro de gravedad se traslade desde la producción... a la protección...".

Se trata, por tanto, de una obra colectiva, coordinada por Carmen Ortega Hernández-Agero, quien también aborda el marco físico español, resaltando los aspectos climáticos (extensamente), los edáficos (sucintamente) y los orográficos (esquemáticamente).

Daniel Sánchez y Federico Fernández hacen un repaso de las formaciones y series vegetales (con unos esquemas muy sugestivos), considerando las características bioclimáticas de la península (aunque se echa en falta la atención a la evapotranspiración), deteniéndose posteriormente en las distintas formaciones forestales. Estos mismos autores describen, en el siguiente capítulo, los bosques actuales; refieren su situación basados en las estadísticas de ICONA, considerando coníferas y caducifolios, bien como bosques eurosiberianos, mediterráneos o riparios.

Antonio García, Leopoldo Yoldi y José L. Langa pretenden reconstruir la historia de los bosques actuales, aspecto que complementa los capítulos anteriores y siguiente, coincidiendo en que la Mesta y la Desamortización son dos elementos claves en dicha historia. Estos mismos autores, en otro capítulo más adelante, tratan de la repoblación forestal, haciendo también hincapié en los matorrales, el significado de los pinares y la elección de la especie, considerando asimismo problemas técnicos que se plantean al preparar el suelo e implantar las especies a repoblar, finalizando el capítulo con un análisis de la actualidad repobladora moderna, basándose en el anuario de estadística agraria del ministerio de agricultura.

Helen Grome añade al aspecto histórico anterior la evolución de la política forestal en España en un corto capítulo, mientras que Cristina Alvarez expone los aspectos legales del bosque, relacionando las disposiciones legales vigentes referentes al tema. Roberto Ipinza relata, en un largo capítulo, los problemas patológicos de los ecosistemas forestales, exponiendo extensas listas de organismos patógenos de los bosques españoles. Juan A. Sánchez, en un corto capítulo, nos muestra, por su parte, algún caso de contaminación atmosférica en el territorio español. Fernando Prieto, basándose igualmente en estadísticas de ICONA, expone largamente el grave problema de los incendios forestales, verdaderamente el factor limitante de incremento de la superficie forestal española. Víctor Castillo añade en el siguiente capítulo algunas consideraciones sobre la erosión, fundamentalmente de origen hídrico y de forma general, para luego detenerse en la situación española.

Manuel Ruiz y Alvaro Llorca abordan los aspectos económicos de la producción general, amén de los factores limitantes del bosque en la actualidad. Joaquín Solana da un valioso listado de la cartografía topográfica, temática (geológica, meteorológica, edafológica, forestal, faunística, ecológica, etcétera) y automática, añadiendo ejemplos de las distribuciones forestales en España. José A. Sotelo se aproxima a la educación ambiental, en términos generales, detallando un proyecto concreto; mientras que A. Ramos nos relata una amena controversia entre un conservacionista y un productivista, en clave humorística. Finalmente, ADENA/WWF España denuncia la falta de conocimientos e investigaciones forestales en nuestro país (lo cual es cierto, y de ahí la aparición de un programa nacional sobre sistemas y recursos forestales dentro del Plan Nacional de Investigación Científica y Técnica), y que constituye otro factor limitante (junto a los incendios, la aridez y la escasa rentabilidad).

Esta obra es, pues, de gran interés para los preocupados por los ecosistemas forestales, sean científicos, ecologistas, gestores forestales o políticos. Se echan de menos propuestas de viabilidad económica a nuestras formaciones forestales (quizá porque en el sistema económico imperante ello sea harto difícil), y a mi entender se cargan demasiado las tintas acerca de la "perniciosa" desamortización de Mendizábal, sin tener en cuenta que las "hambrunas" (es decir, aspectos sociales que han asolado intermitentemente España hasta mediados de este siglo) han alcanzado amplios sectores de la población española y que, en muchas ocasiones, existió la creencia de que la ampliación de las zonas cultivadas solucionaría su desesperada situación (con razón o sin ella); por ello, quizá con los ojos actuales de que el problema es precisamente el contrario (la existencia de excedentes agrícolas), sea difícil hacer una crítica histórica objetiva sobre la Mesta, la Desamortización y demás situaciones que afectaron directa o indirectamente los bosques ibéricos. Por último, se echa de menos la inclusión de breves *curricula* –y sus direcciones, si procede– de cada uno de los colaboradores del *Libro rojo de los bosques españoles*. (J. G.)

PORTRAITS OF VIRUSES. A HISTORY OF VIROLOGY. Dirigido por F. Fenner y A. Gibbs. Editorial Karger; Basilea, 1988.

Escribe, zumbón, Fraenkel-Courat, al dar la última pincelada a su boceto del virus del mosaico del tabaco: "quizá me ha salido el retrato de *Heinz Fraenkel-Courat* pintado por el señor Virus del Mosaico del Tabaco" (p. 20). Se vacuna así ante la posible infección, sesgo diríamos, que sufren quienes en el crepúsculo de su vida de investigación toman la péñola para contarnos los avatares de su disciplina.

Y, sin embargo, es necesario. El grado de refinamiento que han adquirido las distintas disciplinas impone una preparación honda en el asunto a historiar. Las técnicas implicadas y el bagaje teórico, bioquímico y genético en este caso, no se substancian con unos conocimientos generales de introducción o manuales. Tal vez por ello no suelen abundar, al menos en nuestros lares, los estudios serios sobre el desarrollo contemporáneo de la ciencia.

Impotencia o incapacidad que se cela con un atropellamiento de nombres, fechas y conceptos sin más orden ni ligazón, por lo común, que la sucesión en que aparecen escritos. Pero si el mester se deja en manos de los profesionales de la ciencia en cuestión se corre el riesgo obvio de que nos cuenten la feria según les ha ido. Onfalocentrismo que distorsiona, evidentemente, la realidad y peligro del que no se libra del todo esta maravillosa y variopinta galería de retratos de personajes ultramicroscópicos.

Decía Xavier Zubiri que la historia de la filosofía era filosofía. Juicio que puede aplicarse a todos los campos del saber. La historia de una especialidad no es ajena al desarrollo interno de la misma. Además de alumbrar los puntos nucleares en estos momentos de arborescente diversificación, enseña las vías maestras y los métodos o planteamientos que resultaron fecundos para otros. Por eso, con acertado criterio, Frank Fenner y Adrian Gibbs, de la Universidad Nacional Australiana en Camberra, pensaron, hace ahora once años, "que había llegado el tiempo de acometer una primera colación de materiales e iniciar la historia de la virología e idearon llevarla a la práctica solicitando de los virólogos aventajados que prepararan un 'retrato' del virus, o familia de virus, en cuya investigación habían empeñado ellos la mayor parte de su vida". Y puesto que los interesados, antes que nadie, eran los profesionales de esa ciencia joven, debían publicarse, no en una revista de historia, sino en *Intervirology*, uno de los principales portavoces del ramo.

Así, desde el año 1978 han ido apareciendo, con asidua periodicidad, los perfiles aquí recogidos. Dejemos de lado si alguno o varios se han ensombrecido con la pátina del tiempo, por ejemplo en lo concerniente al comportamiento inerte del virus en la célula hospedante. El primer retrato es el de los poxvirus, creado por la paleta de Frank Fenner, quien no se limita a esa cohorte de virus de ADN en su dotación genética, sino que, con buen criterio, recrea una introducción general a la virología y los campos en que se desarrolla: sistemática, naturaleza particulada, morfología, química, propagación o infección, genética, patología, inmunología, control, evolución, erradicación y origen.

Los virus están constituidos por una o varias moléculas de ácido nucleico –ADN o ARN–, una cubierta proteica o cápside y, en ocasiones también, de ácidos grasos y material carbohidratado. Distinguimos en ellos dos fases; en la llamada intracelular –para medrar necesitan introducirse en una célula bacteriana, vegetal o animal–, el virus aprovecha el material bioquímico del hospedante para replicarse y sintetizar las proteínas víricas; en la fase extracelular, producida la lisis celular, el virión desactiva su poder infeccioso. Ofrecen, pues, una doble vertiente, la infecciosa y la genético-evolutiva. Se ocupan de la primera la inmensa mayoría de los artículos aquí compendiados, que encierran asimismo cuanto se sabe sobre los agentes culpables de buen número de nuestros males: gripe, resfriado común, sarcoma de Rous, etcétera.

Desde el punto de vista de la genética, es de dominio público la importancia que tuvieron el bacteriófago lambda y el fago de ARN en el despegue de esa ciencia básica y de la biotecnología. Bacteriófago es el nombre que F. d'Herelle dio a los virus devoradores de bacterias; posteriormente se descubriría que esa destrucción celular –o lisis– resultaba de tres procesos más o menos contemporáneos: transcripción del genoma vírico y síntesis de las proteínas, entre ellas las "precoces" o moléculas represoras de la replicación y expresión génica autónomas del virus, inicio de la replicación del virus y entrada en el estado de profago, o fago atemperado, de uno o varios genomas ya replicados. (Las moléculas represoras no bloquean la replicación del profago en sincronía con el genoma de la célula hospedante.) Gracias a la relativa sencillez del genoma vírico, la investigación genética pudo empezar a conocer regiones de decisiva importancia en el proceso de replicación y transcripción del ADN. En ese mismo nivel de interés se sitúan los fagos de ARN. Unos y otros encuentran en esta pinacoteca su sitio.

La "oveja negra" de los virus son los viroides. Lo dice el propio T. O. Diener, autor de quien los lectores de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA conocen un artículo de ese mismo título. Deben su rareza no tanto a su tamaño, son los menores de cuantos agentes vivos se conocen, cuanto a su origen reciente (en nuestro siglo), al parecer en una brusca emergencia *de novo*. Surgirían, quizá, de elementos génicos transponibles. Infectan a los vegetales.

Virus vegetal por excelencia es el del mosaico del tabaco. Con quien, además, comienza la virología. Cien años atrás, los patólogos veían impotentes que muchas enfermedades infecciosas no las producían ni las bacterias ni los protozoos; en 1852 D. J. Ivanovski observó que el agente causal de la enfermedad de las hojas del tabaco traspasaba los filtros cerámicos de Chamberland, que eran impermeables a cualquier microorganismo hasta entonces identificado. No creyó sin embargo que la infección no fuera bacteriana. Más tarde, en particular, desde el empuje teórico del holandés M. W. Beijerinck, se comenzó a pensar en atribuir una naturaleza propia a los "virus filtrables", que con el tiempo perdieron el adjetivo, pero no su fuerza. La virología continúa. Apenas se ha erradicado algunas infecciones (viruela), brotan amenazadoras otras (SIDA). En la genética y biotecnología, beneficiadas del estudio de los virus, se confía para hacerles frente. (L. A.)

MAMÍFEROS Y HELMINTOS, volumen homenaje al profesor Herman Kahmann, preparado por V. Sans-Coma, S. Mas-Coma y J. Gosálbez. Ketres Editora; Barcelona, 1987.

El valor universal y común, con interrelaciones inextricables entre todas las especies animales –en verdad entre todas las especies de vivientes– se pone muy claramente de manifiesto en este volumen de estudios zoológicos, que han dirigido con gran acierto los profesores Valentín Sans-Coma y Joaquín Gosálbez, catedráticos de zoología de vertebrados en las universidades de Málaga y Complutense de Madrid, respectivamente, con la valiosa ayuda del profesor Santiago Mas-Coma, del departamento de parasitología de la fa-

cultad de farmacia de la Universidad de Valencia.

Los tres editores han recopilado un selecto conjunto de trabajos sobre mamíferos (y algunos otros vertebrados) y helmintos parásitos de diversos grupos de mamíferos, particularmente insectívoros y roedores, con una pequeña incursión hacia la zoología de los cetáceos. Pero no han olvidado el interés que tienen los anfibios y reptiles de la Península Ibérica –que se denominan ahora "herpetos", con neologismo no demasiado elegante, pero sí efectivo y simplificador–, tanto desde el punto de vista biogeográfico, dada la peculiar posición de la península y el archipiélago balear en el conjunto del área geográfica paleártico-mediterránea, como desde el punto de vista parasitológico.

Y en efecto, desde los precursores trabajos de Cameron, que fue uno de los primeros autores que relacionó diversos grupos de vertebrados con sus helmintofaunas parásitas, se han incrementado los estudios referentes a parásitos y a sus efectos sobre las formas hospedadoras. Gracias a estos trabajos se han podido comprender mejor bastantes aspectos de la distribución geográfica, filogenia y evolución de muchos grupos de vertebrados con sus helmintos y protozoos parásitos, incluida la evolución misma de los ciclos vitales de las formas parasitarias heteroxenas.

Si tenemos en cuenta el interés creciente, tanto puramente científico (lo que llaman los alemanes "wissenschaftliche Zoologie") como de aplicación médica, veterinaria o farmacéutica (esto es, la "angevandte Zoologie") tal como se refleja en la bibliografía biológica más reciente, respecto a la necesidad de unificar estudios procedentes de las especialidades más diversas, comprenderemos la oportunidad de un volumen integrador de estas áreas científicas tan aparentemente distantes como las del mundo de los vertebrados y el de los helmintos.

Este ejemplo, que debemos agradecer a los editores, lo vemos repetido, sin ir más lejos, en uno de los últimos números de la revista *American Zoologist* (vol. 29, n.º 2, 1989), que recoge estudios sobre los mecanismos de inmunodefensa en infecciones parasitarias, en relación con procesos filogenéticos. De este modo la inmunoparasitología, a partir de Butterworth (1975) y Capron (1987), con una extensa nómina de seguidores, ha experimentado un llamativo rejuvenecimiento. El volumen que ahora comento habrá de contribuir en España a una necesaria renovación de los estudios zoológicos de tipo integrador y, aunque sólo fuera por ello, y ciertamente el libro encierra muchos otros valores, sus editores merecen los plácemes de los zoólogos españoles.

Las notas monográficas dedicadas a vertebrados, entre las que destacan singularmente las revisiones faunísticas, taxonómicas y sistemáticas sobre roedores e insectívoros, sin que se hayan olvidado aspectos biológicos y morfométricos, han sido coordinadas por V. Sans-Coma y J. Gosálbez. Los trabajos sobre helmintofaunas de vertebrados tratan de varios aspectos ecológicos y biogeográficos de gusanos parásitos, con una especial atención a cestodos y trematodos; su coordinador ha sido S. Mas-Coma.

La lista de colaboradores del volumen es muy extensa, aunque con un marcado predominio de los procedentes de las facultades de biología de Barcelona y Málaga, como es lógico dada la vinculación y procedencia de los tres editores. Constituye, pues, una densa publicación, muy dignamente presentada por Ketres Editora, impresa por Romargraf, S.A., de Hospitalet de Llobregat (Barcelona, 1987) en un volumen de 338 páginas, con una riquísima información bibliográfica, varias figuras, esquemas y tablas numerosísimas. Si cabe alguna indicación negativa, desde el punto de vista editorial, sería la del tipo de letra elegido, que a veces resulta demasiado pequeño y poco legible, igual que algunas figuras algo empastadas en su rotulación (cf. *v. gr.*, figura 7, pág. 289).

Los directores de la publicación dedican este volumen, que será de obligada consulta y fuente bibliográfica importante para los zoólogos durante mucho tiempo, al profesor Herman Kahmann, del Instituto Zoológico de la Universidad de Munich, en su octogesimoprimer aniversario. (R. A.)

ZERO PHONON LINES, por K. Rebana *et alii*; Springer-Verlag. Berlín, 1988.

Este libro trata de un aspecto importante de la espectroscopía óptica de cristales con impurezas: las llamadas líneas de cero fonones ("zero-phonon lines" o ZPL). Su origen está en las transiciones electrónicas que acontecen en los centros de impureza de un cristal y viene a ser, por tanto, el análogo óptico del efecto Mössbauer, que tiene su origen en las transiciones nucleares en dichos centros. Las ZPL del espectro son muy agudas y su forma y frecuencia proporcionan una gran cantidad de información física acerca del centro de impureza y sus alrededores. Además, las ZPL poseen una extremada sensibilidad a las inhomogeneidades del cristal, produciéndose un ensanchamiento de las líneas, que pueden llegar a ser millones de veces más anchas que en el caso homogéneo.

El desarrollo de la tecnología del láser ha proporcionado una herramienta básica para la espectroscopía ZPL. Adquiere especial interés el denominado "quemado de huecos espectrales" ("spectral hole burning" o SHB), cuya esencia física es la fototransformación, de un modo altamente selectivo desde el punto de vista espectral, de las impurezas presentes en matrices sólidas a bajas temperaturas. Esta transformación se produce mediante la absorción de radiación monocromática vía su ZPL. En el proceso, la alta frecuencia de la radiación desempeña un papel esencial, ya que es lo que garantiza que cada fotón posea la energía suficiente para iniciar una transición electrónica, produciéndose un quemado efectivo. Por el contrario, no son necesarias grandes intensidades, y la mayoría de las aplicaciones se realizan dentro de la región lineal. Las aplicaciones actuales, y las previsibles en el futuro, son numerosas. De algunas de ellas se hace eco el presente volumen.

La obra contiene una selección de trabajos acerca de las ZPL y del SHB, todos ellos de científicos de la URSS que han contribuido importantemente al desarrollo de este campo. De hecho, la mayor parte de los trabajos corresponde al Instituto de Física de la Academia de Ciencias de Estonia, bajo la dirección del profesor K. Rebana. Precisamente él es el autor del primer capítulo en el que, de un modo somero, revisa algunos aspectos históricos y teóricos de las ZPL y sus aplicaciones. A continuación viene un capítulo de contenido teórico, por M. A. Krivoglatz, acerca del ensanchamiento de las ZPL en cristales y vidrios debido a las interacciones de los electrones de los centros con los fonones y las vibraciones locales de la red. En el capítulo siguiente, V. V. Hizhnyakov propone un método no perturbativo para analizar el efecto del acoplo cuadrático de las vibraciones, que es una alternativa a los métodos anteriores de Kubo y Toyozama y de Levenson. El resto de la obra está dedicado a diversas aplicaciones de las ZPL y el SHB en cristales, moléculas poliatómicas, vidrios, holografía en el dominio espacio-temporal, superradian-

cia, etc. También hay una interesante revisión general de J. Kikas acerca de la técnica de SHB, con un especial énfasis en las aplicaciones.

La obra puede considerarse dirigida a una audiencia restringida y a la vez amplia. Restringida porque es sólo para especialistas e iniciados en el tema. Los capítulos, concisos, no son fáciles de leer para los no expertos. Por otro lado, es amplia porque interesa no sólo a los físicos, sino también a los químicos y biólogos que usen o estudien técnicas espectroscópicas de ultra-alta resolución. Para ellos, resultarán de especial atractivo las numerosas referencias a la bibliografía rusa que, a menudo, no es tenida en cuenta en la investigación occidental. (J. B.)

SELECTED PAPERS, de Subrahmanyan Chandrasekhar. The University of Chicago Press; 1989.

A los pocos meses de serle concedido el premio Nobel de física (1983), Subrahmanyan Chandrasekhar recibió una oferta de la editorial The University of Chicago Press para publicar sus trabajos científicos ya aparecidos en distintas revistas. Es fácil advertir que dicha tarea es notable, pues el primero de ellos ("The Compton scattering and the new statistics") se remonta a 1929 y, desde entonces, no ha cesado de publicar, año tras año, a buen ritmo. Su aportación a la física y a la astrofísica es amplia –por la variedad de temas tratados– y profunda, pues en muchos casos sus hallazgos se han mostrado decisivos. Efectivamente, entre sus líneas de investigación cabe señalar la teoría de estrellas enanas blancas, transferencia radiativa, estructura y estabilidad estelar, dinámica de fluidos, cristales líquidos y agujeros negros. Así las cosas, no debe extrañarnos que la mencionada editorial prevea cinco o seis volúmenes; cada uno de ellos prologado por una autoridad en la materia.

Los artículos de esos volúmenes se han seleccionado de acuerdo con dos criterios fundamentales. En primer lugar, no haber sido incluidos con anterioridad en algún texto del autor; en segundo lugar, que éstos versen sobre temas de interés histórico y no se hayan abordado con suficiente detalle.

Los artículos se suceden en cada sección con un orden cuasi-cronológico. Nos ocuparemos de los dos primeros volúmenes, los publicados hasta la fecha. Los restantes verán la luz, probablemente, dentro de los dos próximos años.

El primer volumen comprende la época europea del autor (1930-1937) y los primeros años (hasta 1945) de su época norteamericana, amén de dos breves trabajos –los primeros– aún en Madrás. Consta de cuarenta y cuatro artículos distribuidos en cinco secciones: teoría de las estrellas enanas blancas (19 artículos), equilibrio de polítropos distorsionados (6), evolución estelar (4), teoremas integrales sobre el equilibrio estelar (7) y la teoría de atmósferas estelares (8). Precisamente un aspecto fundamental de su contribución a las enanas blancas, el fijarles una masa límite (1.44 masas solares), le valdría, medio siglo después, la máxima distinción de la academia sueca en el campo de la física.

Merece la pena mencionar que en la sección dos se encuentra el núcleo de la tesis doctoral de Chandrasekhar, defendida en la Universidad de Cambridge. De indudable interés histórico también la discusión (artículo veinticuatro) por parte de Milne, Russell y Eddington –tres notables astrofísicos de la primera mitad de siglo– sobre el equilibrio de polítropos distorsionados. La sección número tres contiene un delicioso artículo, muy breve, aparecido en la revista *Nature* (1937), sobre las constantes físicas de la naturaleza, relacionado con la hipótesis de Dirac de los grandes números.

El segundo volumen cubre aproximadamente el período 1945-1955. Contiene treinta y cinco artículos distribuidos en dos secciones. La primera se ocupa de la transferencia radiativa (25), dividida, a su vez, en distintas subsecciones, y la segunda de la física y astrofísica del ion negativo de hidrógeno (10). Puede decirse que aquélla constituye la substancia de este volumen –uno de los mayores logros científicos de Chandrasekhar–. Si bien esos artículos fueron publicados en un período de tiempo relativamente corto, su influencia en la comunidad científica fue profunda y duradera. De entre ellos conviene señalar dos de revisión: "The transfer of radiation in stellar atmospheres" (número 24) y "Radiative transfer –a personal account" (número 25), quizá los más pedagógicos de este volumen.

Ambos volúmenes servirán a expertos en la materia, especialmente a los interesados en el desarrollo de la astrofísica. En este sentido cabe decir que son insustituibles. Sin embargo, no son aconsejables, como primera lectura al neófito, quien deberá iniciarse al hilo de tratados clásicos redactados con ánimo didáctico. (D. P.)

Apuntes

Frisa ya la centena el número de galardonados con el Nobel que describieron para los lectores de *Investigación y Ciencia* el fruto de sus trabajos e hipótesis antes de recibir el premio. Ratificando tan honrosa tradición, los de este año habían escrito para la revista, entre otros, artículos antológicos sobre oncogenes, retrotranscripción y función enzimática del ARN.

Una invención revolucionaria del Renacimiento en el campo de la botánica fue la desecación de las plantas para crear los herbarios (de ahí su nombre latino de *exsiccata*). El trasiego de pliegos permitió la confección de las primeras floras regionales. Los modernos han abandonado el viejo sistema de prensas por el rapidísimo horno de microondas. El inconveniente de éstos estriba en que dañan y destruyen esporas y polen, que quedan así inservibles para su examen. Obstáculo que parece salvarse si se substituye la exposición continua por un secado de pulsos de microondulación.

La configuración tripartita de la tierra en núcleo, manto y corteza es fruto de la evolución térmica en la que intervienen procesos de fusión y estratificación por razón de la densidad. El manto litosférico, de los continentes y de los océanos, se asocia a una capa fría y conductiva, unida, por arriba, a la corteza y, por abajo, al manto astenosférico, convectivo. La potencia o espesor de la litosfera depende de su edad y de su entorno tectónico. El año pasado, V. J. M. Salters y N. Shimizu, dos geoquímicos, postularon que el manto litosférico crecía merced al material fraccionario procedente de procesos de fusión ocurridos en el manto astenosférico. Hipótesis puesta hoy en duda por otros químicos del Instituto Max Planck, para quienes la inyección de nuevo material sería del tenor de las fuentes de basalto de las dorsales centro-oceánicas y de las islas oceánicas.

Entre los problemas éticos que se plantean los científicos, el primero es el relativo a la vida y el respeto a la persona. Por eso, a propósito del trasplante de tejido de humanos en fase fetal, los dos máximos organismos de investigación alemanes, la Max-Planck Gesellschaft y la Deutscheforschungsgemeinshaft, han hecho público su rechazo a cualquier investigación que recurra a embriones. La administración Bush persiste en su moratoria hasta que no se perfilen los límites de lo aceptable. La legislación inglesa prevé una clara separación entre aborto y uso de tejido procedente de un feto muerto, en el sentido de que se prohíbe toda relación entre las clínicas donde se practica el aborto y los laboratorios de investigación. Escrúpulos que no parecen preocupar a otros países o a quienes invocan una supuesta ética civil de la constitución.

En el quehacer de la ciencia, los momentos de obscuridad y contradicción suelen predominar sobre los instantes fugaces de intuición y seguridad. La astrofísica pasa, en la parcela de las galaxias activas, por esa situación: nuevas e importantes observaciones confunden más que aclaran. Los núcleos de dichas galaxias son, casi por definición, regiones de un brillo simpar, generado por el calentamiento de gas y polvo que crece sobre un posible agujero negro. ¿Cómo explicar el núcleo descubierto con un brillo cien mil veces por debajo de lo característico? Entre distintas opciones alternativas, puede seguirse una ya habitual escapada hacia adelante en esas aporías: esos núcleos son comunes, pero no los conocíamos; en este caso porque sólo se manifiestan en las galaxias enanas.

Las células eucariotas, que se distinguen por su núcleo definido, se desarrollaron, creen los biólogos, de procariotas —células carentes de la peculiaridad anterior—. En ese proceso evolutivo tendría que haber, además, algún tipo de simbiosis entre antepasados sin ligazón: una célula huésped, un antepasado mitocondrial, un antepasado cloroplástico o un procariota que aportó las estructuras de la actual motilidad celular, los undulipodios. La última posibilidad, aunque la más controvertida, parece, por otro lado, la más poderosa. Se cita, para corroborarlo, el caso de las bacterias, que, para salvarse de la acción mortífera de los antibióticos, adquieren genes de otras entidades, los plásmidos por lo común. El proceso de simbiosis aparece así como un medio de extraordinaria potencia para la innovación genética, una fuente de evolución no menor que la mutación y la recombinación entre homólogos.